МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

СМиС-2026
ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Материалы
Международной научно-технической конференции

(Россия, Москва, 21–23 мая 2026 г.)

SMaC 2026
QUALITY MANAGEMENT TECHNOLOGY

Proceedings
of the International Scientific and Technical Conference

(Russia, Moscow, May 21–23, 2026)

Составители: А.П. Адылина, Д.А. Клочкова, В.Р. Ливитин

Текстовое электронное издание

Москва
2026

Об издании 1, 2

УДК 658.5(082)
ББК 30.607
С50

Рецензенты:
Г.И. Грозовский, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по научной работе АО «НТЦ «Промышленная безопасность»;
А.С. Корнев, к.т.н., начальник лаборатории ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России

СМиС-2026. Технологии управления качеством = SMaC 2026. Quality Management Technologies: материалы Международной научно-технической конференции (Россия, Москва, 21–23 мая 2026 г.) = Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Russia, Moscow, May 21–23, 2026) / сост.: А.П. Адылина, Д.А. Клочкова, В.Р. Ливитин. – Москва: Московский Политех, 2026. – 1 CD-R. – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.
ISBN 978-5-2760-3020-3.

С50

Материалы конференции содержат статьи, в которых рассмотрены современные вопро-сы науки, техники, образования и практики применения результатов научных исследо-ваний в области качества.

Сборник предназначен для широкого круга читателей, интересующихся научными исследованиями и разработками, научных и педагогических работников, преподавателей, докторантов, аспирантов, студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

УДК 658.5(082)
ББК 30.607

Статьи публикуются в авторской редакции.
Ответственность за точность цитат, имен, названий и иных сведений, а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности несут авторы.
При перепечатке материалов ссылка на настоящий сборник обязательна.

Системные требования: PC-совместимый процессор 1,3 ГГц и выше. Оперативная память (RAM): 256 Мб. Необходимо на винчестере: 350 Мб. Операционные системы: Windows, Mac OS. Видеосистема: разрешение экрана 1024x768. Дополнительные программные средства: Adobe Acrobat Reader 9 и выше.

ISBN 978-5-2760-3020-3

© Адылина А.П., Клочкова Д.А., Ливитин В.Р., составление, 2026
© Московский Политех, 2026

Содержание

Введение 20

СЕКЦИЯ 1
ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ

Акулич А.А., Шешенев Н.В.
АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОДБОРА СПОСОБОВ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ 21

Левченко А.А., Пудовкин Д.Р., Селиверстов Д.В.
ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ 27

Ушаков М.В., Воробьев И.А., Никольский С.М., Литвинова А.А.
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЯМОЗУБЫХ КОЛЕС НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ 33

Бриль Д.С., Огурцова К.М.
МОДУЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА «СВЧ КИТ» КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОТОТИПИРОВАНИИ СВЧ-РАДИОТРАКТОВ 41

Коновалова Е.В., Хомутова Е.Г.
МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ГОТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ 50

Мотлич П.А., Малахов А.В., Павлова О.В.
ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ: ОТ ВЕРИФИКАЦИИ К УПРАВЛЕНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ 57

Малышко А.О., Бурдули В.В.
ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ 68

Костырин М.К.
РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ ЦИФРОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 74

Юдочкин П.Ю., Ушаков М.В.
РАСЧЕТ И УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ЕЕ МИНИМИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ 79

Чиликина Н.М., Вячеславова О.Ф.
СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ПРОДУКЦИИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ: РЕГУЛЯТОРНЫЙ АСПЕКТ 89

Черкин А.М., Фахрутдинова А.А.
ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ: СУТЬ, ПРИМЕНЕНИЕ И МЕТОДИКА 96

Зеньков Е.В., Фалеева Е.Ю.
ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПАССАЖИРСКОМ КОМПЛЕКСЕ: ОПЫТ АО «ФПК» В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ 105

Кушнир И.С., Адылина А.П.
ЭФФЕКТИВНОСТЬ 3D-СКАНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТА ПРИ АВТОНОМНОМ И ПРОМЕЖУТОЧНОМ ИЗМЕРЕНИИ ДЕТАЛЕЙ, НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ 114

СЕКЦИЯ 2
ИННОВАЦИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Смирнов В.А., Смирнов С.В., Овчинников В.В.
АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ..... 124

Чуликова Ж.Е., Овчинников В.В.
АКСЕЛЕРАТОР ДЕФЕКТОВ СПЛАВА 18–8..... 132

Демидов А.А., Овчинников В.В.
АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА АК12, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА..... 141

Михонов В.В., Хажакян В.О., Михонов И.В.
ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЛАВА Al-5%Cu В ПРОГРАММЕ THERMO-CALC С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ..... 152

Баскаков А.П., Оганесян Р.О., Фокина М.С.
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРУЮЩИХ ПРОКЛАДОК НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 159

Вьялицын Н.С., Овчинников В.В.
ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 168

Богуш Д.М., Овчинников В.В.
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТОДОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ 176

Слезко М.Ю., Сбитнев А.Г., Овчинников В.В.
ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ АРГОНА НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЛАВА 1565ч 183

Полякова Е.П., Овчинников В.В.
ВЛИЯНИЕ ПОДКЛАДКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ СПЛАВА В-1469-Т, ВЫПОЛНЕННЫХ СТП 191

Артемьев Г.К.
ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ СЛОЕВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ 201

Дмитрашко П.С., Овчинников В.В.
ВЫБОР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПАКЕТА ТОНКИХ ЛИСТОВ СПЛАВА 1565чМ 208

Мамедов Дж., Сулейманова Н., Мустафаева Н., Гулиева Х.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦЕЗИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ 217

Киселев В.Е., Овчинников В.В., Смирнов С.В., Ливитин В.Р.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА 1565чМ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ 228

Новоселов Р.А., Овчинников В.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1565чН2 ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ 236

Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Гиршфельд П.А.
К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ МОДЕЛЕЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ РИСКОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТНО-ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА. ИННОВАЦИОННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МАШИНОВЕДЕНИИ 243

Саводякина А.М., Овчинников В.В.
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ СПЛАВА 1565чМ И АРМИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ Al_2O_3, ПОЛУЧЕННЫЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ 252

Резцов Р.Б., Овчинников В.В.
МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА ТИПА ЛИНИИ СТЫКА В СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ОДНОСТОРОННЕЙ СТП 261

Быкова А.Е., Овчинников В.В.
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РАЗНОИМЕННОМ СОЧЕТАНИИ, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ 270

Пинясова М.А., Овчинников В.В.
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16 И 1163, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ 280

Панас П.А., Овчинников В.В.
ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Cu–Mn 288

Ткачук Е.В.
ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНОГО НАНОПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН 298

Соловьев И.С., Бабуев М.А., Овчинников В.В.
ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ПЛАЗМУ РАЗРЯДА 303

Володин К.Е., Овчинников В.В.
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РУЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ 309

Васильев Д.Н., Овчинников В.В.
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ 319

Типалин С.А., Фролов Н.Л., Климов В.А., Шпунькин Н.Ф.
ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ХОЛОДНОКАТАНОГО ЛИСТА 328

Утяганова В.Р., Харисов К.А., Семин В.О., Зотов Б.О., Шишкин Д.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА Mg-Al-Zn-Mn, ИЗГОТОВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ 334

Панина Е.В., Типалин С.А.
ОЦЕНКА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ДЕТАЛИ «КОЖУХ» В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ QFORM 343

Барбасов Н.В.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ АППАРАТУРЫ, ЭКРАНИРОВАННОЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ 349

Жданович О.А., Овчинников В.В.
ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 356

Клочков Я.М., Овчинников В.В.
СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Zn–Mg–Ca, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ 364

Доан Суан Куанг, Филиппов Ю.К.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ГОРНОГО РЕЗЦА МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ 371

СЕКЦИЯ 3
ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА

Лихота Р.В., Лонцих П.А., Лонцих Н.П.
DIGITAL 5S: AI-АССИСТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА В КОНЦЕПЦИИ LEAN 4.0 378

Abimolda I.S., Baibula N.Z., Karimova Z.N.
INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN IMPROVING THE QUALITY OF ENGLISH LANGUAGE TEACHING: THE POTENTIAL OF MOBILE APPLICATIONS 386

Елисеева Н.В., Алёшин К.П.
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ 389

Денисенко С.А., Богдасарян Л.А., Миронов Г.С.
УПРАВЛЕНИЕ ЗАТРАТАМИ НА УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ 396

Сюмайкина В.М.
ЦИФРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ ОФОРМЛЕНИЯ И УЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДЪЯВИТЕЛЬСКИХ И ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ 403

Алиева А.А., Винокурова С.А., Соловьёва В.А.
ДОМАШНЯЯ МЕТРОЛОГИЯ: РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛАССА ТОЧНОСТИ БЫТОВЫХ ВЕСОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ БЕЗ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ 409

Искиердо Паредес Райдель, Адылина А.П.
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В СФЕРЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ 426

Малютина В.О.
ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В СРЕДУ ОБЩИХ ДАННЫХ (CDE) ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ 434

Знахаренко А.Д., Винокурова С.А., Соловьева В.А.
«ЧЕСТНЫЙ ЗНАК» КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЩЕСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ В СТАНДАРТИЗАЦИИ И ЦИФРОВОЙ МЕТРОЛОГИИ: КОМПЛЕКСНЫЙ ОБЗОР МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ 443

Семашко М.Д., Сырейщиков А.А.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ВУЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА 451

Катюхина И.О., Парфеньева И.Е.
ИСПЫТАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ОКОН В ЦЕЛЯХ ИХ СЕРТИФИКАЦИИ 457

Клочкова Д.А., Левина Т.А.
КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ: АПРОБАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ МОДУЛЯ ПЕРЕДКА АВТОМОБИЛЯ 464

Батенков К.А.
ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЭРЛАНГА 471

Садовченко Е.А., Жмайло М.А., Боровков А.И.
МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ИСПЫТАНИЙ 479

Симонов М.В., Мартынец Е.Р., Корниенко А.В.
НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ 484

Яроцкая Н.А., Постникова Е.С.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА 491

Наумов В.А.
ОПЕРАЦИОННЫЕ РИСКИ РУЧНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЕРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И КРИТЕРИИ ПЕРЕХОДА К АВТОМАТИЗАЦИИ 499

Имангулова А.И.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СЕРТИФИКАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА АДДИТИВНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ 507

Вертинская Н.В., Парфеньева И.Е.
ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В НАУКОЕМКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ 517

Акулов Н.А., Нарышкин Р.А., Жебоноева К.А., Аллагулова В.О.
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ 524

Суслов М.В., Кадочникова А.Н.
ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА 531

Лямин Б.М., Путилова Е.В.
ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ 5С НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА 537

Воробьева Я.А., Голушкова У.А., Наджафалиева М.С., Червякова В.К.
ПРЕМИИ КАЧЕСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ 544

Тихомиров А.В.
ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ШУХАРТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА 551

Шпак С.А.
ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ШУХАРТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 557

Абедалхуссайн Ахмед Али, Ляпунцова Е.В.
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ ВРЕДОНОСНЫХ ПРОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 563

Елисеева Н.В., Морозова Л.С.
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛЕКАРСТВЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ 575

Злыдникова Е.Р.
ПРОВЕДЕНИЕ ABC-XYZ-АНАЛИЗА И КЛАСТЕРИЗАЦИИ КЛИЕНТСКОЙ БАЗЫ 581

Исрайилова А., Скопинцев И.В.
РАЗРАБОТКА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ: ПОИСК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ АЛЬТЕРНАТИВ УПАКОВКЕ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 590

Карагадян А.Н.
РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ 599

Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Гиршфельд П.А.
РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И СВЯЗАННЫХ ОТРАСЛЯХ. ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ДОСТИЖЕНИЯ ПРИЕМЛЕМЫХ РИСКОВ 604

Чернова Т.Г., Савостикова О.Г.
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗАКУПАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ В ООО «ТЕХНОСЕРВИС» 613

Есембаев М.Т., Парфеньева И.Е.
РЕВЕРСИВНЫЙ АНАЛИЗ ВИДОВ И ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКАЗОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ 617

Мамаев В.А.
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ И НАДЕЖНОСТЬЮ ИЗДЕЛИЙ ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ: ВЫПОЛНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ И КОНТРОЛЬ СООТВЕТСТВИЯ 627

Федорова Н.Б., Лобач Я.В.
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРТИЗЫ КАЧЕСТВА КОЖЕВЕННО-ОБУВНЫХ И ПУШНО-МЕХОВЫХ ТОВАРОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ 633

Аманкулыев Э.М., Эрметова В.И.
СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И БУДУЩЕЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНЖЕНЕРИИ 639

Корень И.С.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ БЕСПИЛОТНЫХ САМОХОДНЫХ МАШИН В ЕАЭС И ЕВРОПЕЙСКОМ СОЮЗЕ 644

Ubaiddullaeva S.V., Pazilkhanova S.A., Karimova Z.N.
THE ROLE OF DAILY ROUTINE IN ADOLESCENTS' ENGLISH LANGUAGE LEARNING 653

СЕКЦИЯ 4
АВТОМАТИКА, РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

Постникова Е.С., Постников А.В., Кошевой А.Р.
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ВИБРОМОНИТОРИНГА 658

Шагиев Р.Р., Архипов Ю.Г., Чиков А.Д.
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РАДИОСИГНАЛА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АНТЕННЫ 667

Архипов Ю.Г., Шагиев Р.Р., Чиков А.Д.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СВОБОДНЫХ ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ 673

Дегтяренко Э.В., Попов Н.С.
НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКЦИИ И ОРИЕНТАЦИОННОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СОРТИРОВКИ 689

Чернышова А.А., Михеев М.А.
ОБЗОР РОБОТИЗИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ 696

Чиков А.Д., Шагиев Р.Р., Архипов Ю.Г.
ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПАМЯТИ В СИМУЛЯТОРЕ РОЯ БПЛА С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ КВАДРОДЕРЕВА 704

Сабитов Р.А., Мадаминов Х.О.
ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ 711

Борисова О.В., Борисов И.И., Колюбин С.А.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КИСТЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАХВАТОВ ОБЪЕКТОВ 716

Батуков А.М., Брагин К.А., Данильченко М.Д., Панюта Л.К., Яценко Д.В.
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ УПРАВЛЯЕМОЙ АНТЕННЫ РЕТРАНСЛЯТОРА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО УРОВНЮ СИГНАЛА 726

Обидин Р.Ю., Сингизин И.И.
РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА 735

Гарафутдинова С.И., Никишина Г.В.
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ИМИТАТОРА БОРТОВЫХ СИСТЕМ С ИНТЕРФЕЙСОМ ARINC-429 ДЛЯ ЗАДАЧ НАЗЕМНОЙ ОТЛАДКИ АВИОНИКИ 741

Барышев Н.Н., Архипов М.В.
РОБОТИЗИРОВАННЫЙ УЧАСТОК ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ И СОРТИРОВКИ АКБ 748

Сабитов Р.А., Мадаминов Х.О.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ 753

Мел Сантос Камповерде, Лыу Чыонг Фук
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ РОБОТИЗИРОВАННОГО УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ В ОТВЕРСТИЯХ ДЕТАЛЕЙ 758

Котов А.К., Лагута В.С.
УПРАВЛЕНИЕ УЧЕБНОЙ ГПС «DENFORD» НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА 768

У Цюе, Рачков М.Ю.
ЦИФРОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА 777

Хайруллин А.А., Коломейченко А.В.
К ВОПРОСУ ТРАНСМИССИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА 784

Хитров В.А.
МЕТОДЫ ЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ КОЛЕС НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 791

СЕКЦИЯ 5
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАЗВИТИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Богданчиков И.Ю., Юдина А.В.
ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСНАЩЕННОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК НА СТАБИЛЬНОСТЬ КАЧЕСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ: МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЦИИ В СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА 802

Абрамов Ю.Н., Жирков Е.А., Угланов М.Б.
ВЫКАПЫВАЮЩИЙ РАБОЧИЙ ОРГАН КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЯ 813

Дион Кори, Адылина А.П., Ндиайе А.К., Фалль М.С., Сов В.Р.
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА СЕНЕГАЛА 818

Левина Т.А., Клочкова Д.А., Клочков Я.М., Носкова В.Е.
КОНЦЕПЦИЯ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ 824

Абрамов Ю.Н., Жирков Е.А., Угланов М.Б.
МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ БОТВОУДАЛИТЕЛЬ КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА 831

Латыпова Э.Х., Минибаева И.И., Кузнецов Н.А.
ОБЗОР МИРОВЫХ ПРАКТИК СЕРТИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В РОССИИ 836

Осипова Т.П., Жебанов А.В.
ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ 842

Рахманов Н.И., Скопинцев И.В., Гафаров В.А.
ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ ОТХОДОВ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ 848

Левина Т.А., Клочков Я.М., Клочкова Д.А., Носкова В.Е.
ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ЕЕ РЕШЕНИЮ 859

Колошеин Д.В., Чернышов Р.В., Долгов И.О.
ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В КАРТОФЕЛЕХРАНИЛИЩЕ С НАВАЛЬНЫМ ТИПОМ ХРАНЕНИЯ 865

Пилип Л.В., Сырчина Н.В.
УСТОЙЧИВОСТЬ *ESCHERICHIA COLI* К ПОДКИСЛЕНИЮ И ГИПОХЛОРИТУ НАТРИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НАВОЗНЫХ СТОКОВ 872

Береснев В.А., Бабкина А.А.
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ 876

СЕКЦИЯ 6
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Меньшиков А.Д., Сычик В.С.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ФБУ «НИЦ ПМ – РОСТЕСТ» 882

Назаров Д.В.
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ МЕХАНООБРАБОТКИ 891

Хазиев Б.Р., Фахрутдинова А.А.
АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ SMART GRID В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 897

Махъянова А.И., Фахрутдинова А.А.
БИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПЕРСОНАЛА: ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И СОЦИАЛЬНОЕ БЛАГОПОЛУЧИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ 906

Морозов И.А.
БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ КАК ДРАЙВЕР ПЕРЕХОДА ОТ РЕАКТИВНОГО К ПРЕДИКТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ 915

Аконовенко И.А.
ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ СЕРВИСНОГО СЕКТОРА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ 925

Ванчурин М.Д., Затонский И.В.
ИНТЕГРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ТРУДОЕМКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ ЦИФРОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ 934

Колосова О.В., Антамошкин О.А., Жучков Ф.Г.
ИИ-АГЕНТЫ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ: ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ПОТЕРИ УПРАВЛЯЕМОСТИ 943

Джаманбалин Б.К., Джаманбалин К.К., Абдыкалыкова А.У.
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ 952

Замураев Р.Д., Фахрудтинова А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ, ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ВЭУ), ГЭС В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РОССИИ 962

Косых А.М.
МЕТОД И СИСТЕМА УДАЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ЭПИЛЕПТИЧЕСКИМ СИНДРОМОМ НА ОСНОВЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЭГ 970

Елизарова Н.Ю., Климковский Я.И.
МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКОЙ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ..... 978

Анферова М.С.,
МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 985

Савостикова О.Г., Соловьева П.В.
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НА ПРЕДПРИЯТИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА ЦИФРОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ 992

Полкуев Р.Н., Иванова И.В.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО КОНТУРА КАЧЕСТВА ТРАНСФЕРА ТЕХНОЛОГИЙ В ЭКОСИСТЕМЕ «УНИВЕРСИТЕТ – МИП – ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР» (НА ПРИМЕРЕ РГАТУ ИМЕНИ П.А. СОЛОВЬЁВА)..... 998

Рудницкий С.Б., Понамарев И.В.
МОДЕЛЬ ПОЭТАПНОГО СНИЖЕНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРАКТИК УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ 1006

Елизарова Н.Ю., Викторов М.С.
ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К УЧЕТУ ЗАТРАТ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ 1012

Чуктурова А.К., Фахрудтинова А.А.
ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ 1022

Вербицкий А.С., Тимаков Г.А.
ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ ВУЗОВ 1028

Ершов Д.С., Горностаева А.К.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ: ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ..... 1038

Скорняков Р.Ю.
ПОДХОДЫ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ О НЕСООТВЕТСТВИЯХ В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ..... 1046

Гладкова О.И.
ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАБОТНИКА ОТК НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ . 1051

Титов Д.С., Постникова Е.С.
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ 1061

Авдеева М.Н., Петухов С.Л.
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ SHAP И LIME К РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ RANDOM FOREST ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ 1069

Сабитов Р.А., Мадаминов Х.О.
ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ 1073

Щербань П.С.
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА 1080

Фахрутдинова А.А.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ УСЛОВИЙ Г. МАХАЧКАЛЫ 1088

Елисеева Н.В., Шаповалова А.А.
РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМЫ ЦВЕТОВОЙ АДАПТАЦИИ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ С ДАЛЬТОНИЗМОМ 1096

Гусева В.П., Алексашина О.В.
РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0 1102

Доненко И.Л., Доненко С.Л.
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОТКРЫТОЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В КАРЬЕРАХ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ 1109

Струсевич С.К., Кривоносова Н.В.
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА 1114

Расторгуев А.А.
РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СИЗ НА ОСНОВЕ СКВОЗНОГО КОНТРОЛЯ, СТАТИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ И ВНУТРЕННЕГО АУДИТА В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ ПРЕДПРИЯТИЯ 1119

Лопухина М.Б.
РАСХОЖДЕНИЕ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА И ИИ КАК ФАКТОР РИСКА В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ 1130

Ершов Д.С., Горностаева А.К.
РИСК УСТАРЕВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В ИТ-ОТРАСЛИ: СТРАТЕГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ ЦИКЛОМ 1139

Каримов А.А., Рахманов Н.И.
РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ В ПОВЫШЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЭПОХУ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ 1145

Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Ерофеев М.Н.
СТРАТЕГИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПРОРЫВА. РИСКОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОЕКТНО-ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД В ЦЕПИ ПОСТАВОК. ЦЕЛИ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ, ПОКАЗАТЕЛИ ПРИГОДНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕНЕДЖМЕНТА: РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЗАЩИЩЕННОСТЬ 1150

Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Габур С.П.
СТРАТЕГИЯ СИСТЕМНОГО ПРОРЫВА. ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА, СОКРАЩЕНИЯ ПЕРИОДА СОЗДАНИЯ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА. КАЧЕСТВО И РИСКИ 1159

Туркова В.Н.
ТЕХНИЧЕСКИЕ ВНЕДРЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ЭКСПЕРТУ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗЪЯТИЯ СЛЕДОВ НА МЕСТЕ ПРЕСТУПЛЕНИЯ 1167

Царегородцев Р.А., Кольчугина Е.М., Евсеев А.О.
ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА: МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ НА РОССИЙСКИХ ЗАВОДАХ 1171

Уланова А.В., Осинин М.Д., Ерин Д.А.
ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ЗАЩИТЫ ПРАВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ МАРКИРОВКИ ТОВАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 1176

Насыров Д.Д., Мкртчян Г.А., Мешочков Д.М., Казанов А.М., Ларионов А., Королев П.С.
ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА «ФОРМАТ» ДЛЯ ПРОЦЕССНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО АУДИТА НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ 1187

Учкин Д. Р.
ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК С СИМУЛЯЦИЕЙ МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ OpenStreetMap 1198

Адылина А.П., Князев Д.А.
ЦИФРОВИЗАЦИЯ АУДИТА ВНЕШНИХ ПОСТАВЩИКОВ В ХОЛДИНГОВОЙ СТРУКТУРЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОМПАНИИ 1202

Никонорова А.В.
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В АККРЕДИТОВАННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ 1208

Кочукова А.Б.
ЦИФРОВИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ АКТИВОВ И ПАССИВОВ КОММЕРЧЕСКИХ БАНКОВ В УСЛОВИЯХ ВОЛАТИЛЬНОСТИ КЛЮЧЕВОЙ СТАВКИ (2022–2025) 1215

Бестаев С.К.
ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СОРТИРОВКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ИЗМЕНЧИВОМ СОСТАВЕ ВХОДНОГО ПОТОКА 1222

Альмусави Мустафа Рияд Кетаб, Ляпунцова Е.В.
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЖЕЛУДКА: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЖКТ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ 1230

Колесенков А.Н.
ЦИФРОВОЙ ПАСПОРТ ИЗДЕЛИЯ КАК ЯДРО СКВОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦИИ 1245

Решетов М.А.
ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОЦЕССОВ КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ 1253

Бурдули В.В., Малышко А.О.
ЦИФРОВЫЕ РЕШЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ СКВАЖИНАМИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА 1258

Кайкова И.В., Елисеева Н.В.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ 1263

Денисенко Д.А., Елисеева Н.В.
РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ AI-СИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ MLOPS И ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 1269

Бабухин А.О., Ибатулин М.Ю.
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АГЕНТ-ОРКЕСТРАТОР КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ БИЗНЕС-КОММУНИКАЦИЙ И УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 1278

СЕКЦИЯ 7
СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ КОМПАНИЙ

Романец В.И., Колосова О.В.
АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СУБЪЕКТОВ МАЛОГО И СРЕДНЕГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА 1289

Ряжева Ю.И., Пяткова Е.В.
ВЛИЯНИЕ ЗРЕЛОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ 1295

Савостикова О.Г., Ксибати Д.
ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА УПРАВЛЕНИЕ СТРАНОЙ 1302

Левина Т.А., Грозовский Г.И., Макушкин А.С.
ИЗМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В СООТВЕТСТВИИ С ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ 1308

Смелова М.В., Леванова Т.А.
ИННОВАЦИИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА ПИЩЕВОЙ (КОНДИТЕРСКОЙ) ПРОМЫШЛЕННОСТИ 1315

Павлов В.А., Прокопенко Р.В., Сергеева Е.Е.
ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НАЦИОНАЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЭНОГАСТРОНОМИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ 1325

Голикова Е.В., Вопилин В.В.
КАК ПОСТРОИТЬ СИСТЕМУ МОТИВАЦИИ ДЛЯ СОТРУДНИКОВ РАЗНЫХ ПОКОЛЕНИЙ (ОТ БУМЕРОВ ДО ЗУМЕРОВ) 1333

Голикова Е.В., Вопилин В.В.
КАК РЫНОЧНАЯ СТОИМОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ ЗАВИСЯТ ОТ ВЛОЖЕНИЙ В ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ КАПИТАЛ 1338

Плахотникова Е.В., Кондратова А.И.
КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РИСКОВ 1344

Ковалева Е.А., Парфеньева И.Е.
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ 1350

Калинин Е.А.
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ЭТАПЕ ЖЦП «РАЗРАБОТКА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА 1357

Затонский И.В., Ванчурин М.Д.
КОНТРОЛЬНЫЙ РАЗРЫВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫЕЗДНЫХ ИСПЫТАНИЙ 1366

Саного Мохамаду, Вячеславова О.Ф.
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СМЕШЕНИЯ ПОНЯТИЙ «МАРКЕТИНГ» И «РЕКЛАМА» НА КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННОСТЬ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ МАЛИ 1375

Петухов С.Л., Соловьева В.С.
МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ КОНТРОЛЬНЫХ ИНДИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .. 1383

Ямбаева М.В., Петухов С.Л.
МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ 1390

Терешонок А.С., Феофанов А.Н.
МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМ ВРЕМЕНИ В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА 1400

Гиршфельд П.А., Ромашова Е.Ю.
МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ, ИХ ПРИГОДНОСТЬ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ 1406

Мешкова А.Е., Левина Т.А.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ЕДИНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ РИСКОРИЕНТИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ УЧАСТИЯ В ПРОВЕРКАХ КВАЛИФИКАЦИИ И МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧИТЕЛЬНЫХ (СРАВНИТЕЛЬНЫХ) ИСПЫТАНИЯХ 1414

Силенко А.Н., Дударев С.А.
ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА 1422

Вербицкая Н.Р.
ПОКАЗАТЕЛИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА ПО ISO 30414 КАК ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ АНАЛИЗА СО СТОРОНЫ РУКОВОДСТВА 1427

Мухин М.П.
ПОШАГОВАЯ МЕТОДИКА ВНЕДРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ 1438

Гришаева С.А., Суницкий Я.Р.
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В ПРОЦЕССАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ 1443

Белая М.Н., Гаврисенко С.Л.
ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ ИСИКАВЫ 1456

Уразов В.В.
ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ИНЖЕНЕРНЫМИ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ В СМК ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ 1471

Асадулин Е.О.
РАЗРАБОТКА РИСКОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В КАРДИОЛОГИЧЕСКОМ ДИСПАНСЕРЕ 1478

Демус А.А., Парфеньева И.Е.
РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КАРТОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПЛАТЕЖНОЙ СИСТЕМЫ 1483

Гаврилов М.В.
СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В НИИ 1492

Кудряшов Е.А.
СТАНОВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБУЧЕНИЯ «TRAINING WITHIN INDUSTRY» 1498

Борисов И.С.
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА НОВУЮ ТЕХНИКУ 1504

Хандорина А.С., Алексашина О.В.
УПРАВЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЕЙ В ПРОЕКТЕ КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА 1513

Шкробова В.И.
ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К НЕСООТВЕТСТВИЯМ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА 1517

Елисеева Н.В., Кайкова Ю.В.
ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА: ВИЗУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОДЕЛЯМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 1521

СЕКЦИЯ 8
ШКОЛЬНАЯ СЕКЦИЯ: ЮНЫЕ УЧЕНЫЕ

Обнизов З.С., Коваленко Д.Р., Дмитриенко В.А.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОПОТЕРЬ В ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЯХ 1528

Ушакова А.А.
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СБРАЖИВАНИЯ В СУБСТРАТЕ ЧАЙНОГО ГРИБА ПРИ ВВЕДЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛЕВОДОВ 1534

Овчинников В. В., Чуликова Ж.Е., Хардина В.М.
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ СВАРКЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 1542

Фотинов Р.В., Лазакович Т.В., Суровцева Е.В.
РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ИГРЫ В СРЕДЕ SCRATCH ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКОВ РЕШЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ У МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ 1550

Овчинников В. В., Чуликова Ж.Е., Берташюс И.А.
ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НОВЕЙШИХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ 1555

ВВЕДЕНИЕ

Качество как категория управления – интегральное понятие, которое характеризует рыночную значимость и признание произведенной продукции или услуги. Международная организация по стандартизации определяет качество как совокупность свойств и характеристик продукции или услуги, которые придают им способность удовлетворять потребности потребителей. Качество определяет образ жизни, социальную и экономическую основу успешного развития человека и общества.

Настоящий сборник составлен по итогам Международной научно-практической конференции «СМиС-2026. Технологии управления качеством», состоявшейся 21–23 мая 2026 г. В конференции участвовали представители десяти стран: России, Казахстана, Вьетнама, Китая, Азербайджана, Киргизии, Кубы, Сенегала, Ирака и Мали.

В сборник материалов по итогам конференции вошли статьи, в которых рассматриваются современные вопросы науки, образования и практики применения результатов научных исследований в области качества.

Конференция проходила по следующим восьми секциям.

1. Трансформация точности и эффективности измерений в условиях новых вызовов – 13 статей.
2. Инновации в металлургии и перспективные технологии материаловедения – 31 статья.
3. Технологии и инновации в области качества – 38 статей.
4. Автоматика, робототехника и мехатроника – 18 статей.
5. Инновационные решения для агропромышленного комплекса – 12 статей.
6. Цифровизация процессов управления качеством: вызовы и перспективы – 53 статьи.
7. Системы менеджмента качества и устойчивое развитие компаний – 32 статьи.
8. Школьная секция: юные ученые – 5 статей.

Все 202 статьи прошли рецензирование (экспертную оценку).

Сборник предназначен для широкого круга читателей, интересующихся научными исследованиями и разработками, научных и педагогических работников, преподавателей, докторантов, аспирантов, студентов с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

СЕКЦИЯ 1
ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ

Акулич А.А.
студент
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета
Россия, Рязань
ProMake-TY@yandex.ru
Шешенев Н.В.
к.т.н., доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»
Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета
Россия, Рязань
n.sheshenev@yandex.ru

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОДБОРА СПОСОБОВ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Проблема обеспечения сейсмостойкости зданий остается критически актуальной: только в 2024 году жертвами землетрясений стали 730 человек, а количество разрушенных домов превысило 50 тысяч. Целью работы является алгоритмизация процесса подбора способов сейсмозащиты для упрощения принятия проектных решений на ранних этапах. В статье выполнен комплексный анализ существующих методов пассивной и активной защиты, включая системы сейсмоизоляции (резинометаллические опоры, фрикционные маятниковые подшипники), демпфирующие устройства (вязкостные, фрикционные, металлические демпферы), а также динамические гасители колебаний и традиционные конструктивные меры. Для каждого метода детально рассмотрены принцип действия, преимущества, недостатки и области применения. Основным результатом исследования является разработанная логическая блок-схема, устанавливающая четкие алгоритмические связи между ключевыми параметрами объекта (сейсмичность региона, этажность, жесткость конструкции, тип грунта и назначение сооружений) и оптимальным выбором технологий сейсмозащиты. Данная схема представляет собой интеллектуальный инструмент предварительного проектирования, позволяющий на основе последовательных ответов по условиям получить рекомендации по применению конкретных методов с последующим детальным расчетом согласно нормативным документам. Работа выполнена с применением методов синтеза, анализа и классификации.

Ключевые слова: сейсмозащита, нетрадиционный методы сейсмозащиты, инновационные сейсмические технологии.

Akulich A.A.
Student
Ryazan Institute (Branch) of Moscow Polytechnic University
Russia, Ryazan
ProMake-TY@yandex.ru
Sheshenov N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Industrial and civil construction
Ryazan Institute (Branch) of Moscow Polytechnic University
Russia, Ryazan
n.sheshenev@yandex.ru

ALGORITHMIZATION OF THE PROCESS OF SELECTION OF METHODS OF SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Abstract. Ensuring seismic resistance in buildings remains critical: in 2024 alone, 730 people died in earthquakes, and the number of destroyed buildings exceeded 50,000. The aim of this study is to algorithmically evaluate the process of selecting seismic protection methods to facilitate early design decisions. This article provides a comprehensive analysis of existing passive and active protection methods, including seismic isolation systems (rubber-metal mounts, friction pendulum bearings), damping devices (viscous, friction, and metal dampers), as well as dynamic vibration dampers and traditional structural measures. For each method, the operating principle, advantages, disadvantages, and areas of application are discussed in detail. The main result of the study is a developed logical flowchart that establishes clear algorithmic links between key facility parameters (regional seismicity, number of storeys, structural rigidity, soil type, and structure purpose) and the optimal choice of seismic protection technologies. This scheme is an intelligent preliminary design tool that, based on sequential responses to conditions, provides recommendations for the application of specific methods, followed by detailed calculations in accordance with regulatory documents. The work was carried out using synthesis, analysis, and classification methods.

Keywords: seismic protection, non-traditional methods of seismic protection, innovative seismic technologies.

Проблема обеспечения сейсмостойкости зданий остается критически актуальной: только в 2024 году жертвами землетрясений стали 730 человек, а количество разрушенных домов превысило 50 тысяч.

Целью работы является алгоритмизация процесса подбора способов сейсмозащиты для упрощения принятия проектных решений на ранних этапах. Основными задачами являются рассмотрение текущих способов сейсмозащиты и разработка блок-схемы, по которой можно будет осуществлять выбор метода сейсмозащиты в зависимости от различных условий.

В настоящем разделе выполнен детальный обзор основных категорий методов и технологий сейсмозащиты с указанием их принципа действия, преимуществ, недостатков, областей применения, а также количественных показателей эффективности и предельной выдерживаемой сейсмической нагрузки. Данные показатели получены на основе обобщения результатов натурных испытаний и численного моделирования [1–12].

Сейсмоизоляция

Свинцово-резиновые опоры – резина обеспечивает гибкость, свинцовый сердечник – прочность и демпфирование.

Эффективность: снижение сейсмических нагрузок на каркас в 1,5–2 раза, уменьшение ускорения перекрытий на 28–29%, снижение межэтажных перекосов на 64–66%, пиковых напряжений – на 60–70% [4, 5].

Максимальная нагрузка: работоспособны при PGA до 1,78 g [6].

Недостатки: высокая стоимость и сложность монтажа, замена после сильного землетрясения не требуется.

Область применения: мосты, АЭС, больницы.

Стальные-тефлоновые подушки – сферические стальные поверхности скользят друг по другу с тефлоновым покрытием.

Эффективность: снижение горизонтальных ускорений на 28–29%, уменьшение перемещений основания здания на 60–68% при PGA = 0,1–0,3 g [7].

Максимальная нагрузка: выдерживают PGA до 0,8–1,0 g

Особенность: нулевое демпфирование, но обеспечивают самовозврат в исходное положение.

Область применения: высотные здания, объекты с ценным оборудованием.

Резиновые опоры без свинца – многослойные слои резины и стали.

Эффективность: эффективное увеличение периода колебаний, но низкое демпфирование.

Максимальная нагрузка: до 0,6 g.

Область применения: жилые и общественные здания в сейсмичных районах.

Демпфирование

Вязкостные демпферы – поршень продавливает вязкую жидкость, энергия рассеивается в тепло.

Эффективность: снижение перемещений и сил на 68–80%, сокращение смещения крыши на 53,2%, двукратное снижение вероятности повреждений [8].

Максимальная нагрузка: PGA> 0,44 g.

Область применения: каркасы высотных зданий, мосты, усиление существующих сооружений.

Фрикционные демпферы – специальные поверхности трутся с заданной силой.

Эффективность: стабильность характеристик, не зависят от температуры. Типичное увеличение эквивалентного демпфирования до 15–20%.

Максимальная нагрузка: до 0,6–0,8 g.

Недостатки: износ поверхностей, необходимость контроля натяжения.

Металлические демпферы – пластическая деформация стали, свинца или алюминия.

Эффективность: повышение допустимой PGA на 54–175% по сравнению с обычными зданиями, поперечная сила в основании снижается на 72% [9].

Максимальная нагрузка: алюминиевые демпферы выдерживают PGA до 1,7 g [9].

Недостатки: одноразового действия.

Область применения: связи в каркасах, деформационные швы, бюджетные проекты.

Вязкоупругие демпферы – деформация полимерных материалов между стальными пластинами.

Эффективность: эффективны как при ветровых, так и при сейсмических нагрузках, но зависят от частоты и температуры [10].

Максимальная нагрузка: до 0,5 g.

Динамические гасители колебаний

Настроенный массовый демпфер – подвешенная масса на пружинах и демпферах, настроенная на основную частоту здания.

Эффективность: снижение горизонтальных ускорений и напряжений в несущих элементах высотных зданий до 50%, вертикальных колебаний – до 30% [10]. Адаптивные системы TMD обеспечивают подавление вибраций на 60–80% эффективнее пассивных.

Максимальная нагрузка: эффективен в диапазоне PGA до 0,4 g.

Область применения: высотные здания.

Настроенный жидкостной демпфер – жидкость, колеблющаяся в резервуаре.

Эффективность: относительно низкая стоимость, простота конструкции. Снижение ускорений на 20–30%.

Максимальная нагрузка: до 0,3 g.

Область применения: верхние этажи высотных жилых и офисных зданий.

Активные и полуактивные системы

Активные системы – компьютер на основе показаний датчиков рассчитывает и прикладывает управляющую силу к массе-демпферу.

Эффективность: увеличение коэффициента демпфирования основных мод колебаний с ≈0,6% до 2–7% [11].

Максимальная нагрузка: адаптивны к любым нагрузкам, но требуют внешнего источника энергии.

Область применения: уникальные сооружения (небоскребы, башни), где другие методы неэффективны.

Полуактивные системы – изменяют характеристики в реальном времени, требуют меньше энергии, чем активные.

Эффективность: высокая, надежнее активных систем. Повышение демпфирования до 5–10% в зависимости от алгоритма управления [11].

Область применения: перспективные системы для мостов и «умных» зданий.

Традиционные конструктивные меры

Пространственные диафрагмы жесткости – ядра, стены, связи, объединенные в жесткую коробку.

Эффективность: классический отработанный метод, но не поглощает энергию, создает большие инерционные нагрузки. Для обеспечения сейсмостойкости многоэтажного здания достаточно установки 8 диафрагм жесткости [12].

Максимальная нагрузка: рекомендуется только в районах сейсмичностью до 7 баллов по MSK-64 (PGA < 0,1 g).

Сейсмопояса – непрерывные армированные пояса по периметру здания.

Эффективность: обеспечивают равномерное распределение нагрузок, эффективны для малоэтажных кирпичных и панельных зданий. Снижение повреждений на 30–40% при PGA = 0,2–0,3 g.

Максимальная нагрузка: до 0,4 g.

Концептуальные модели современного развития

Занавес из карбоновых стержней – здание прикреплено к земле карбоновыми стержнями.

Эффективность: увеличение способности рассеивать энергию в 30–56 раз по сравнению с обычным зданием, снижение сейсмического риска на 67% для зданий с колоннами из углеродного волокна [7].

Максимальная нагрузка: теоретически до 1,0 g, но технология требует сложных компьютерных расчётов и пока не применяется широко.

«Парящий дом»– при подземных толчках компрессоры нагнетают воздух в специальную подушку под домом, поднимая его в воздух.

Эффективность: полная изоляция здания от вибраций. Подъем здания: до 40 мм [6]. Стоимость в 3 раза дешевле других технологий сейсмозащиты для малоэтажных домов.

Максимальная нагрузка: не ограничена PGA, так как здание физически отделяется от грунта.

Область применения: только для небольших малоэтажных домов, лабораторий, мест хранения опасных веществ.

На основе комплексного анализа методов и технологий сейсмозащиты, нами была разработана логическая блок-схема (рис.) для выбора методов защиты от сейсмических воздействий.

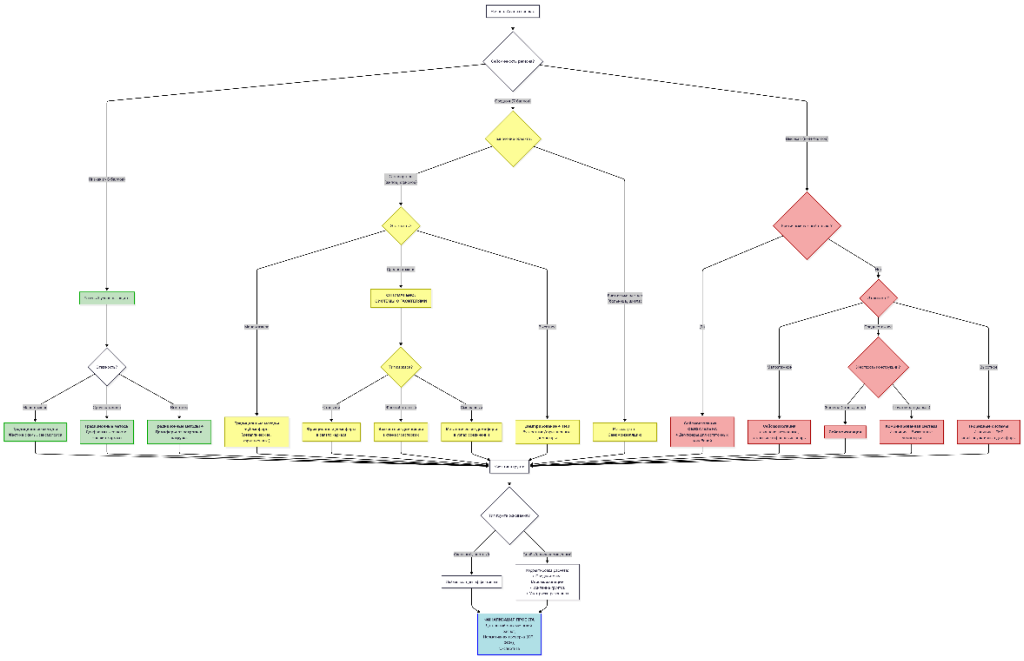


Рис. Блок-схема выбора метода сейсмозащиты

Представленная на рисунке блок-схема может быть формализована в виде текстового описания на языке разметки Mermaid, что позволяет воспроизвести её программным способом. Соответствующий код приведён по ссылке (https://mermaid.ai/d/13ff5e46-6568-4f46-a290-d72053ca442e).

Данная блок-схема представляет собой интеллектуальный инструмент для предварительного выбора методов сейсмозащиты на ранних стадиях проектирования. Для начала работы с блок-схемой нужно:

Шаг 1: определить исходные параметры проекта: сейсмичность региона, этажность здания, жесткость конструкции, назначение объекта и тип грунта.

Шаг 2: начать с блока «Начало: Анализ проекта» и двигаться по стрелкам, отвечая на вопросы. Стрелки показывают направление движения по схеме.

В конце блок-схемы вы сможете получить рекомендацию по одному или нескольким методам сейсмозащиты. После выбора метода необходимо зафиксировать выбранный метод и его параметры, выполнить детальный расчет и проектирование системы в соответствии с нормами (СП, ФСН) и провести экспертизу проекта.

В рамках проведённого исследования нами рассмотрены существующие способы сейсмозащиты и разработана блок-схема, по которой можно осуществлять выбор метода сейсмозащиты в зависимости от различных условий.

Список литературы

1. Халелова, А. К. Обеспечение сейсмостойкости зданий и сооружений / А. К. Халелова. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 46 (336). – С. 40–44.

2. Тарасов В.А., Барановский М.Ю., Редькин А.В., [и др] Системы сейсмоизоляции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №4 (43). С. 117–140.

3. Сейсмостойкое строительство. Учебное пособие для студентов направления подготовки 08.03.01 Строительство – профиля "Промышленное и гражданское строительство" / Составители: Магомедов Р.М., Айламматова Д.А. – Дагестанский государственный университет народного хозяйства – Махачкала: ДГУНХ, 2019. – 110 с.

4. Naeim F., Kelly J.M. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. – John Wiley & Sons, 1999. – 304 p.

5. Skinner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H. An Introduction to Seismic Isolation. – John Wiley & Sons, 1993. – 354 p.

6. Takewaki I. Building Control with Passive Dampers: Optimal Performance-based Design for Earthquakes. – John Wiley & Sons, 2009. – 288 p.

7. Dolce M., Cardone D., Marnetto R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. – 2000. – Vol. 29, No. 7. – P. 945–968.

8. Symans M.D., Constantinou M.C. Passive fluid viscous damping systems for seismic energy dissipation // ISET Journal of Earthquake Technology. – 1998. – Vol. 35, No. 4. – P. 185–206.

9. FEMA 356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. – Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.

10. Soong T.T., Spencer B.F. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice // Engineering Structures. – 2002. – Vol. 24, No. 3. – P. 243–259.

11. Spencer B.F., Nagarajaiah S. State of the art of structural control // Journal of Structural Engineering. – 2003. – Vol. 129, No. 7. – P. 845–856.

12. Paulay T., Priestley M.J.N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. – John Wiley & Sons, 1992. – 768 p.1. Ershov D.S. 2023 Measurement Techniques 66 461-474.

Левченко А.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
naslev1604@gmail.com
Пудовкин Д.Р.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
denispudovkin1@yandex.ru
Селиверстов Д.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
dimonpokemon733@gmail.com

ВЫБОР СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме выбора средств измерений (СИ) при проведении технического контроля с использованием вероятностных критериев

оценки точности. Традиционный детерминированный подход, основанный исключительно на соотношении пределов допускаемой погрешности и допуска на контролируемый параметр, не всегда удовлетворяет современным требованиям экономической эффективности и управления рисками. В работе рассматривается методика выбора СИ на основе оценки вероятностей ошибок первого (риск изготовителя, ложная браковка) и второго рода (риск заказчика, ложное принятие). Показано, что применение вероятностного подхода позволяет оптимизировать затраты на измерительное оборудование, сохраняя при этом заданный уровень достоверности измерительного контроля. Приведен теоретический аппарат расчета вероятностей ложных решений при нормальном законе распределения измеряемой величины и погрешности измерений. Сделан вывод о целесообразности внедрения вероятностных критериев в нормативную документацию предприятий.

Ключевые слова: метрология, средства измерений, вероятностный критерий, погрешность измерений, достоверность контроля, риск изготовителя, риск заказчика.

Levchenko A.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
naslev1604@gmail.com
Pudovkin D.R.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
denispudovkin1@yandex.ru
Seliverstov D.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
dimonpokemon733@gmail.com

SELECTION OF MEASURING INSTRUMENTS USING PROBABILISTIC CRITERIA FOR ACCURACY ASSESSMENT

Abstract. The article is devoted to the actual problem of choosing measuring instruments (MI) during technical control using probabilistic criteria for accuracy assessment. The traditional deterministic approach, based solely on the ratio of the permissible error limits to the tolerance for the controlled parameter, does not always meet modern requirements for economic efficiency and risk management. The paper considers a methodology for selecting MI based on assessing the probabilities of type I errors (producer's risk, false rejection) and type II errors (consumer's risk, false acceptance). It is shown that the application of the probabilistic approach allows optimizing the costs of measuring equipment while maintaining a given level of measurement control reliability. The theoretical apparatus for calculating the probabilities of false decisions under the normal distribution law of the measured value and measurement error is presented. A conclusion is drawn about the expediency of introducing probabilistic criteria into the normative documentation of enterprises.

Keywords: metrology, measuring instruments, probabilistic criterion, measurement error, reliability of control, producer's risk, consumer's risk.

В современном производстве и научных исследованиях качество выпускаемой продукции и достоверность результатов испытаний напрямую зависят от правильности выбора средств измерений (СИ) [1]. Традиционно в метрологической практике выбор СИ осуществляется на основе детерминированного подхода, при котором предельная погрешность измерения не должна превышать определенной доли от допуска на контролируемый параметр (обычно от 1/3 до 1/5). Однако данный метод имеет существенный недостаток: он не учитывает вероятностную природу как самой измеряемой величины (параметра продукции), так и погрешности измерения.

Жесткие требования к точности СИ ведут к необоснованному завышению стоимости измерительного оборудования и контроля в целом. С другой стороны, использование недостаточно точных СИ приводит к экономическим потерям из-за брака или рекламаций. В связи с этим все большую актуальность приобретает выбор средств измерений с применением вероятностных критериев оценки точности, которые позволяют сбалансировать стоимость измерительного процесса и риски принятия неверных решений при приемо-сдаточных испытаниях [5].

Теоретические основы вероятностного подхода

Процесс измерительного контроля детали или параметра заключается в установлении соответствия действительного значения параметра заданным техническим требованиям (полю допуска). Из-за наличия погрешности измерений результат контроля является случайной величиной [2].

При контроле годности параметра возникают ошибки двух видов:

1. Ошибка первого рода (ложная браковка, риск изготовителя P_m) – ситуация, когда действительное значение параметра находится в пределах допуска (деталь годная), но из-за погрешности измерения результат измерения выходит за границы допуска, и деталь признается бракованной.
2. Ошибка второго рода (ложное принятие, риск заказчика P_n) – ситуация, когда действительное значение параметра выходит за пределы допуска (деталь бракованная), но в результате погрешности измерения результат оказывается в пределах допуска, и деталь признается годной.

Вероятностный критерий выбора СИ заключается в том, чтобы подобрать такую точность прибора, при которой риски P_m и P_n не превышают экономически или технически обоснованных пределов. Данные принципы заложены в ряде государственных стандартов, нормирующих погрешности контроля [4].

Математическая модель оценки рисков

Для расчета вероятностей ложной браковки и ложного принятия используются методы теоретической метрологии и теории вероятностей [2]. Предположим, что измеряемая величина X (параметр детали) имеет нормальный закон распределения с математическим ожиданием M_x(обычно

совпадающим с серединой поля допуска) и средним квадратическим отклонением σ_x. Погрешность измерения Δ также оценивается на основе прямых многократных измерений и подчиняется нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением $\sigma_{изм}$ [3]. Поле допуска ограничено пределами $X_{\min}$ и $X_{\max}$.

Вероятность признать годную деталь бракованной (риск изготовителя) определяется интегралом совместной плотности распределения:

$$P_m = \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} f(x)\left(\int_{-\infty}^{X_{\min}-x} \varphi(\Delta)d\Delta + \int_{X_{\max}-x}^{+\infty} \varphi(\Delta)d\Delta\right)dx,$$

где $f(x)$ – плотность распределения контролируемого параметра;

φ(Δ) – плотность распределения погрешности измерения.

Аналогичным образом вычисляется риск заказчика (вероятность принятия бракованной детали как годной):

$$P_n = \left(\int_{-\infty}^{X_{\min}} f(x) + \int_{X_{\max}}^{+\infty} f(x)\right)\left(\int_{X_{\min}-x}^{X_{\max}-x} \varphi(\Delta)d\Delta\right)dx$$

На рисунке графически представлены области, соответствующие вероятностям принятия правильных и ложных решений при измерительм контроле.

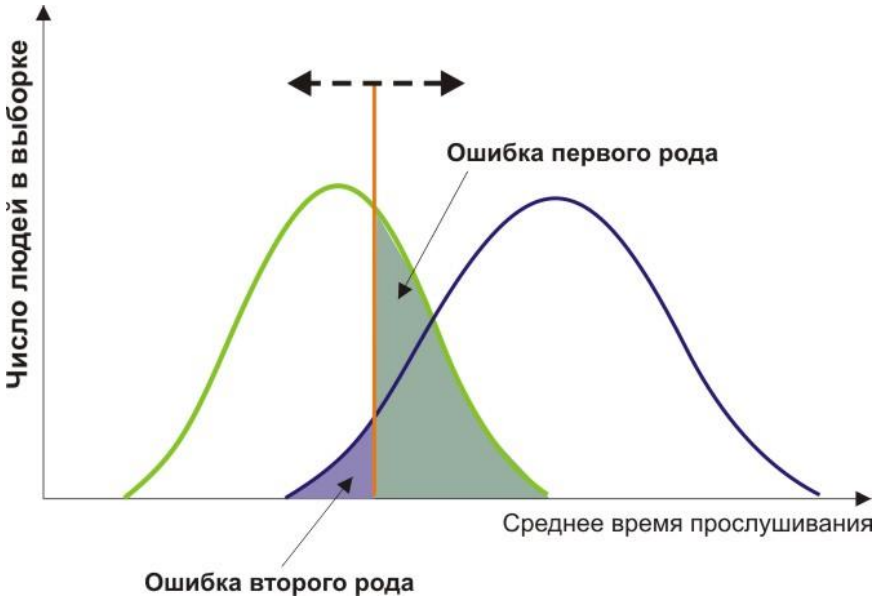


Рис. Распределение плотностей вероятности контролируемого параметра и погрешности измерения, иллюстрирующее области рисков

Практическое применение вероятностных критериев при выборе СИ

На практике прямое вычисление приведенных выше интегралов трудоемко. Поэтому в нормативной документации и инженерной практике используются табулированные значения функций и стандартизированные таблицы рисков [4].

Выбор средства измерений сводится к следующему алгоритму:

1. Определение технологического допуска на параметр ($T = X_{\max} - X_{\min}$).
2. Определение закона распределения параметра в партии изделий (на основе статистических данных производства) [1].
3. Задание максимально допустимых значений рисков P_m и P_n.
4. Определение требуемого отношения точности $A = \sigma_x / \sigma_{изм}$.
5. Подбор реального СИ из Государственного ретра.

Рассмотрим зависимость рисков от отношения предельной погрешности СИ к допуску на изготовление. Данные представлены в таблице.

Таблица

Зависимость вероятности ошибок контроля от соотношения метрологических характеристик

Отношение предела погрешности СИ к допуску	Риск изготовителя (ложная браковка),%	Риск заказчика (пропуск брака),%	Доля правильно забракованных деталей,%
1:3	4.8	0.9	98.1
1:4	2.5	0.4	99.2
1:5	1.1	0.1	99.7
1:10	0.2	0.01	99.9

Как видно из таблицы 1, при ужесточении требований к точности СИ риски экспоненциально снижаются. Вероятностный критерий позволяет инженеру-метрологу обосновать, что для некритичных параметров нет необходимости запать прецизионное оборудование – достаточно инструмента, обеспечивающего риск пропуска брака на уровне 0,9%, что экономически более целесообразно [5].

Влияние смещения настройки на точность контроля

Важным аспектом, который позволяет учесть вероятностный подход, является смещение центра группирования размеров (настройки станка) относительно середины поля допуска. При смещении математического ожидания измеряемой величины вероятности ложной браковки и ложного принятия резко возрастают асимметрично [1]. Если в процессе производства наблюдается систематический уход размера, применение вероятностной оценки точности позволяет своевременно скорректировать требования к СИ.

Выбор средств измерений с применением вероятностных критериев оценки точности является современным, экономически обоснованным подходом в метрологическом обеспечении производства. В отличие от традиционных методов, он оперирует понятиями рисков изготовителя и заказчика, связывая метрологические характеристики приборов напрямую с экономическими показателями качества выпускаемой продукции.

Применение рассмотренной методики на практике требует наличия статистической информации о технологическом процессе, однако эти затраты многократно окупаются за счет оптимизации парка измерительного оборудования. Развитие цифровых систем контроля качества и совершенствование методов оценки погрешностей делают применение вероятностных методов выбора СИ необходимой инженерной практикой [5].

Список литературы

1. Сергеев А.Г. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник и практикум для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Терегеря. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 722 с. – ISBN 978-5-534-16051-2.

2. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Ч. 1. Общая теория измерений: учебник для вузов / И.Ф. Шишкин. – Санкт-Петербург : Питер, 2010. – 192 с. – ISBN 978-5-49807-683-6.

3. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Введен 2013-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 23 с.

4. ГОСТ 8.051-81. Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – Введен 1982-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1982. – 11 с. (с Изменениями № 1).

5. Леонов О.А. Нормирование погрешности косвенных измерений при приёмосдаточных испытаниях двигателей / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба // Измерительная техника. – 2022. – № 8. – С. 23-27. – DOI: 10.32446/0368-1025it.2022-8-23-27.

Ушаков М.В.
д.т.н., профессор кафедры «Инструментальные и метрологические системы»
Тульский государственный университет
Россия, Тула
tulaumv@yandex.ru
Воробьев И.А.
к.т.н., доцент кафедры «Инструментальные и метрологические системы»
Тульский государственный университет
Россия, Тула
imsilya@mail.ru
Никольский С.М.
к.т.н., начальник лаборатории КИМ
АО «АК «Туламашзавод»
Россия, Тула
nikolsky.sergee@yandex.ru
Литвинова А.А.
главный метролог
АО «Тулаточмаш»
Россия, Тула
litvinova.aa@tulatochmash.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЯМОЗУБЫХ КОЛЕС НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Аннотация. В данной работе рассматривается актуальная проблема эффективной и точной оценки качества цилиндрических прямозубых колёс – ключевых компонентов в машиностроении, судостроении, пищевой и горнодобывающей отраслях. Существующие методы контроля, такие как узкоспециализированные зубоизмерительные машины, отличаются высокой точностью, но экономически неоправданны в условиях мелкосерийного, единичного или ремонтного производства из-за значительной стоимости, длительной настройки и необходимости частой переналадки. В то же время ручные средства измерений не обеспечивают необходимой точности и подвержены влиянию человеческого фактора.

Авторы предлагают инновационную методику использования универсальных координатно-измерительных машин (КИМ) для оценки геометрических параметров зубчатых колёс. Разработанная методика включает: определение оптимального числа и координат контрольных точек на боковой поверхности зуба, формирование программы измерений на КИМ, а также алгоритмы обработки результатов в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017. Применение предложенного подхода позволяет существенно сократить временные и финансовые затраты на контроль качества, повысить точность измерений до уровня погрешности КИМ, минимизировать влияние субъективного фактора и расширить функциональные возможности уже имеющегося на предприятиях оборудования. Методика применима для колёс с делительным диаметром до 600 мм и степенью точности 7(6)–12, что охватывает до 85–90% цилиндрических прямозубых колёс, используемых в промышленности.

Ключевые слова: *зубчатые колёса, качество, координатно-измерительные машины (КИМ), методика оценки, геометрические параметры, программное обеспечение, контроль качества, машиностроение, мелкосерийное производство, ремонтное производство.*

Ushakov M.V.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Instrumental and Metrological Systems
Tula State University
Russia, Tula
tulaumv@yandex.ru
Vorobyev I.A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Instrumental and Metrological Systems
Tula State University
Russia, Tula
imsilya@mail.ru
Nikolsky S.M.
Candidate of Technical Sciences, Head of the KIM Laboratory
JSC AK Tulamashzavod
Russia, Tula
nikolsky.sergee@yandex.ru
Litvinova A.A.
Chief Metrologist
JSC Tulatochmash
Russia, Tula
litvinova.aa@tulatochmash.ru

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALITY OF CYLINDRICAL SPUR WHEELS ON UNIVERSAL COORDINATE MEASURING MACHINES

Abstract. This paper considers the urgent problem of effective and accurate assessment of the quality of cylindrical spur wheels, which are key components in mechanical engineering, shipbuilding, food and mining industries. Existing control methods, such as highly specialized gear measuring ma-chines, are highly accurate, but economically unjustified in conditions of small-scale, single or repair production due to the significant cost, long-term setup and the need for frequent changeover. At the same time, manual measuring instruments do not provide the necessary accuracy and are subject to the influence of the human factor.

The authors propose an innovative method for using universal coordinate measuring ma-chines (CMM) to evaluate the geometric parameters of gears. The developed methodology includes: determining the optimal number and coordinates of control points on the lateral surface of the tooth, forming a measurement program for CMM, as well as algorithms for processing the results in accordance with the requirements of GOST 1643-81 and GOST ISO 1328-1-2017. The application of the proposed approach makes it possible to significantly reduce the time and financial costs of quality control, increase the accuracy of measurements to the level of CMM error, minimize the impact of the subjective factor and expand the functionality of equipment already available at enterprises. The technique is applicable for wheels with a dividing diameter of up to 600 mm and an accuracy degree of 7(6)-12, which covers up to 85-90% of cylindrical straight-toothed wheels used in industry.

Keywords: gears, quality, coordinate measuring machines (CMM), assessment methodology, geometric parameters, software, quality control, mechanical engineering, small-scale production, repair production.

Зубчатые колёса занимают особое место в производственном процессе. Они широко применяются в машиностроении, судостроении, пищевой и горнодобывающей промышленности и других отраслях. К показателям качества зубчатых колёс предъявляются высокие требования, что обусловлено разнообразием их видов и широким спектром применения. Обеспечение высокого качества зубчатых колёс критически важно для надёжности и долговечности механизмов и машин [1].

Требования к измеряемым параметрам зубчатых колёс, изложенные в ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017, достаточно жёсткие и предполагают использование дорогостоящего и высокоточного оборудования. В условиях мелкосерийного и единичного производства, при входном контроле комплектующих или при ремонтных работах использование такого оборудования экономически нецелесообразно [2].

В то же время, ручные по степени автоматизации средства измерений не обеспечивают необходимой точности, а универсальные координатно-измерительные машины (КИМ), которые используются для контроля линейных размеров различных деталей, не применяются для оценки показателей качества зубчатых колёс из-за особенностей метода координатного контроля (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид КИМ

Существующие высокоинтегрированные измерительные комплексы, в виде специализированных и узкопрофильных зубоизмерительных машин

(рис. 2) достаточно дорогостоящие и требуют значительного времени на установку, демонтаж изделия, а также на настройку оборудования, что снижает эффективность их использования.



Рис. 2. Внешний вид зубоизмерительной машины

Для полного понимания нюансов использования того или иного измерительного оборудования, рекомендуется рассмотреть их достоинства и недостатки:

1. **Узкоспециализированные зубоизмерительные машины:**

Достоинства: обладают высокими метрологическими характеристиками, позволяют контролировать широкий перечень геометрических параметров.

Недостатки: высокая стоимость, нецелесообразность использования на предприятиях с ограниченным выпуском зубчатых колёс или при входном контроле, необходимость частой настройки и переналадки в зависимости от типа колеса, сложность замены узкоспециализированных приборов на аналоги ввиду их неритмичного выпуска.

2. **Ручные по степени автоматизации средства измерений:**

Достоинства: низкая стоимость.

Недостатки: недостаточная точность, высокий риск погрешностей, связанных с человеческим фактором, необходимость владения множеством методик выполнения измерений, субъективность контролёра при оценке результатов.

3. **Универсальные КИМ:**

Достоинства: высокая точность измерений, широкое распространение на предприятиях, возможность расширения области применения за счёт разработки новых методик, снижение временных и финансовых затрат на переналадку оборудования.

Недостатки: до разработки новой методики не использовались для оценки качества зубчатых колёс, требовалось разработать инструментарий для определения контрольных точек, формирования программы замеров и обработки результатов.

Учитывая вышеизложенные обстоятельства, в настоящее время существует потребность в разработке методики, которая позволит использовать универсальные КИМ для оценки качества зубчатых колёс и тем самым снизить затраты на контроль при сохранении высокой точности измерений. Актуальность исследования данной проблемы подтверждается тем, что цилиндрические прямозубые колеса внешнего зацепления составляют около 85-90% от общего количества зубчатых колес по видам передач, а среди них 97% – прямозубые [3].

В свою очередь, использование КИМ для оценки показателей качества зубчатых колёс актуально ввиду возможности получения достоверных результатов с высокой точностью, снижения затрат на контроль в условиях мелкосерийного и ремонтного производства, уменьшения влияния человеческого фактора и связанных с ним погрешностей, расширения возможностей существующего оборудования без необходимости приобретения дорогостоящих узкоспециализированных приборов, возможности адаптации к различным типам зубчатых колёс без значительной перенастройки оборудования. Анализ, выполненный в ходе проведения исследования показывает, что универсальные КИМ с погрешностью от 3 до 4 мкм подходят для контроля зубчатых колёс с делительным диаметром до 600 мм и параметрами качества в пределах 7(6) –12 степени точности [4]. Учитывая сложность процесса контроля параметров зубчатых колес, требующих измерений не только всех зубьев, но и использования вспомогательных зубчатых колес, предлагается к рассмотрению контроль следующих параметров, дающих наиболее полное представление о точности изготовления изделия и занимающих наименьшее машинное время работы:

1. Радиальное биение зубчатого венца (F_{rr});
2. Колебание длины общей нормали (F_{uWr});
3. Отклонение шага зацепления (F_{Pbr})
4. Погрешность профиля зуба (F_{fr});
5. Погрешность направления зуба (F_{Br});
6. Наименьшее дополнительное смещение исходного контура (E_{Hr}).

Данный набор параметров является достаточным для контроля зубчатых колес 7(6) –12 степени точности в соответствии с рекомендуемым уровнем применения.

В ходе проведенного исследования была разработана специальная методика оценки показателей качества цилиндрических прямозубых колёс на универсальных КИМ, которая включает в себя:

Определение числа и координат контрольных точек на боковой поверхности зуба;

Определение минимально необходимого числа боковых поверхностей зубьев для измерений;

Формирование программы проведения замеров на КИМ;

Обработку результатов измерений.

Для реализации всех положений данной методики было разработано соответствующее специализированное программное обеспечение (ПО) – «Программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес [5], предназначенное для использования в сочетании с универсальными неспециализированными КИМ. Данная разработка представляет собой программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых зубчатых колес, созданный на основе достижений современного уровня техники, известных математических формул и зависимостях, представленных в государственных стандартах (ГОСТ), затрагивающих зубчатые передачи и зацепления. Программно-вычислительный комплекс позволяет выполнять оценку геометрических параметров зубчатых колес в соответствии с разработанной методикой проведения измерений.

Среди главных функциональных возможностей данного ПО можно выделить следующее:

1. Расчет координат точек контрольной сетки на боковой поверхности зубчатого колеса;
2. Определение необходимого числа контрольных точек и их расположение с учётом размеров зубьев и других параметров;
3. Обработка данных, полученных на КИМ, в соответствии с требованиями ГОСТ 1643-81 и ГОСТ ISO 1328-1-2017.
4. Оценка показателей качества цилиндрических прямозубых зубчатых колес.

Архитектуру программного комплекса условно можно разделить на два самостоятельных блока: блок формирования массива координат контрольных точек профиля зубчатого колеса и блок обработки измерительной информации, представленной в виде действительных координат точек профиля зубчатого колеса.

Блок №1 (рис. 3) предназначен для формирования массива координат точек контакта боковой поверхности зубчатых колес и их последующего импорта в базовое программное обеспечение КИМ. Блок №2 (рис. 4) выполняет обработку измерительной информации, представленной в виде действительных координат точек профиля зубчатого колеса, преобразует ее в отклонения контролируемых параметров и определяет соответствие результатов измерений требованиям нормативных документов (ГОСТ).

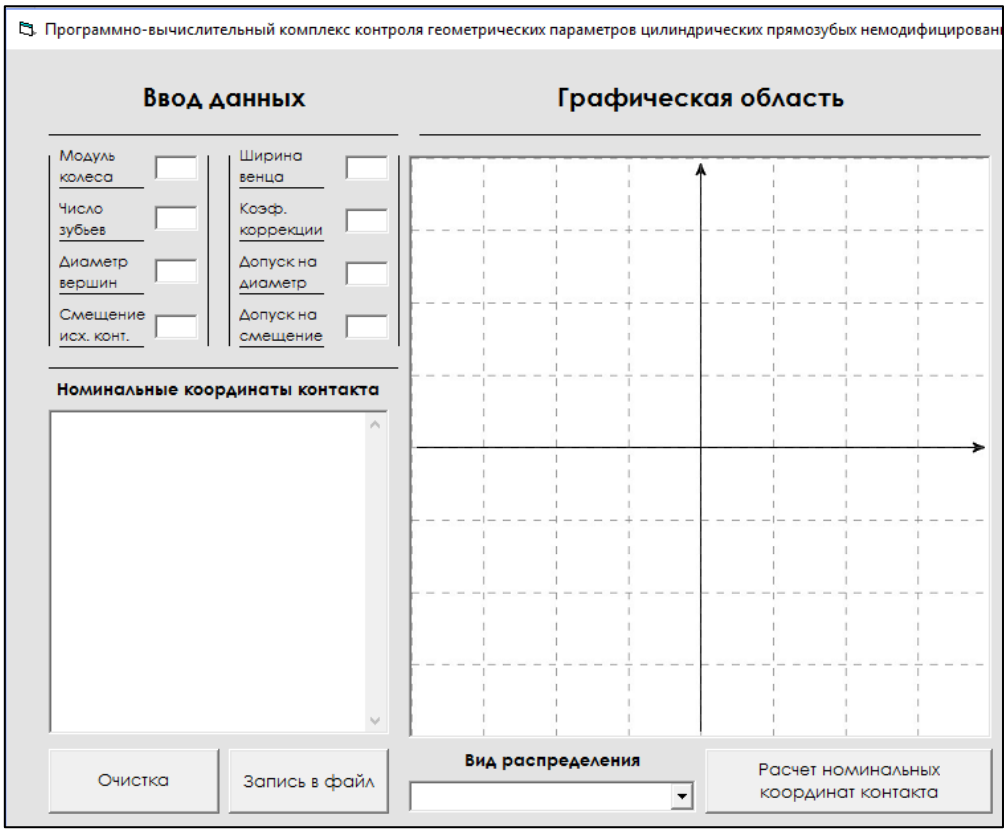


Рис. 3. Блок формирования массива координат контрольных точек

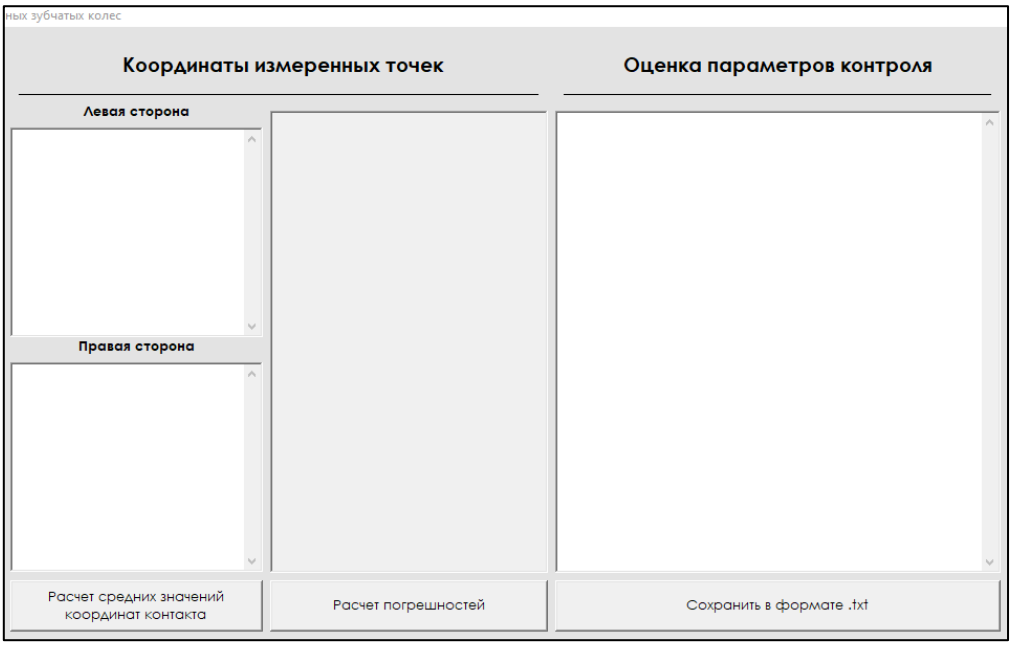


Рис. 4. Блок обработки измерительной информации

Результатом работы разработанного программного обеспечения является формирование отчета измерений по установленной форме (рис. 5).

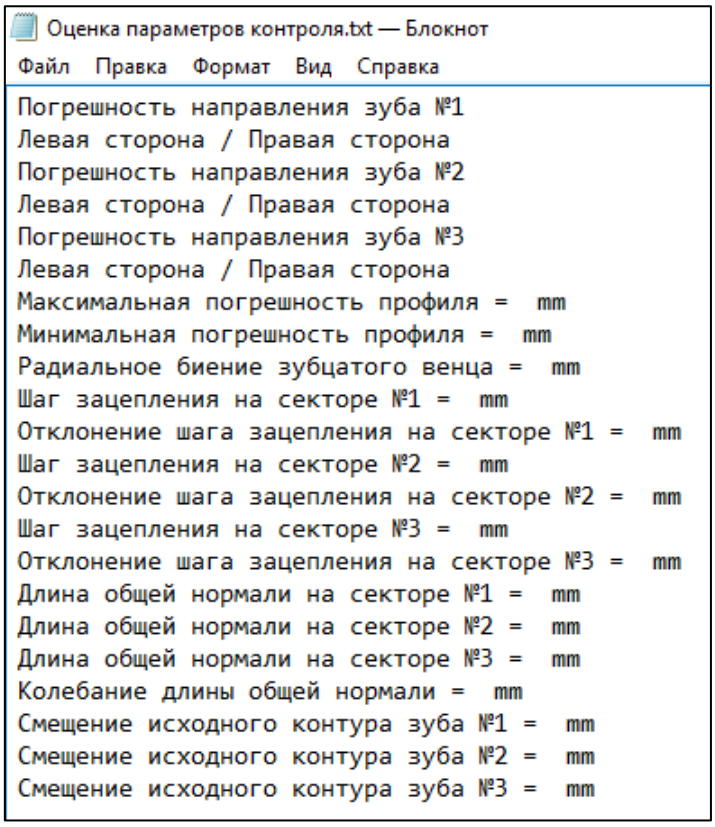


Рис. 5. Форма представления результатов обработки данных

Реализация представленного инструментария в виде методического и программного обеспечения процесса оценки показателей качества зубчатых колес позволяет добиться сокращения временных затрат на оценку показателей качества по сравнению с применением узкоспециализированных и ручных средств измерений, осуществить возможность проведения измерений в полуавтоматическом режиме освобождает оператора КИМ от ручных операций. Разработанное ПО позволяет использовать универсальные КИМ для оценки качества зубчатых колёс, что ранее было затруднительно из-за отсутствия необходимого инструментария, расширяет область применения КИМ и повышает их эксплуатационную эффективность.

Таким образом, разработанное ПО представляет собой инновационное решение для оценки качества зубчатых колёс в условиях мелкосерийного и ремонтного производства. Оно позволяет повысить результативность контроля, снизить затраты и улучшить качество продукции. Проведенные экспериментальные исследования показали, что погрешность оценки показателей качества с использованием разработанной методики не превышает 3 мкм, что соответствует погрешности КИМ. Это позволяет получать достоверные результаты и обеспечивать высокое качество зубчатых колёс. Разработанная методика и ПО могут быть успешно применены на предприятиях машиностроения, а также использованы в учебном процессе при подготовке специалистов в области машиностроения и управления качеством.

Список литературы

1. Никольский С.М. Расчет экономической эффективности эксплуатации координатно–измерительной машины // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – Вып. 9. – С. 601-603.

2. Маликов А.А., Никольский С.М. Функционально-стоимостной анализ использования КИМ для контроля качества зубчатых колес и обкатного зубообрабатывающего инструмента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – Вып 1. – С. 259-263.

3. Сурков, И. В. Современные средства контроля линейно–угловых параметров зубчатых колес / И. В. Сурков, М. В. Мягкова // Оборудование и инструмент. Металлообработка. – 2007. – № 4. – С. 48-51.

4. Ушаков, М. В., Воробьев И.А., Никольский С.М. Возможности использования метода координатного контроля для оценки качества изготовления зубчатых // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025. – № 2.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686365 Россия. Программно-вычислительный комплекс контроля геометрических параметров цилиндрических прямозубых немодифицированных зубчатых колес : № 2024685704 : заявл. 01.11.2024 : опубл. 07.11.2024 / М. В. Ушаков, И. А. Воробьев, С. М. Никольский; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».

Бриль Д.С.
технический специалист
ООО «СВЧ КИТ»
Россия, Москва
brildima1@gmail.com
Огурцова К.М.
генеральный директор
ООО «СВЧ КИТ»
Россия, Москва
info@svch-kit.ru

МОДУЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА «СВЧ КИТ» КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ПРОТОТИПИРОВАНИИ СВЧ-РАДИОТРАКТОВ

Аннотация. В работе рассматриваются метрологические аспекты применения системы быстрого прототипирования «СВЧ КИТ» при разработке и исследовании СВЧ-радиотрактов до 25 ГГц. Показано, что модульный подход к построению радиочастотных трактов, основанный на использовании стандартизированных соединительных элементов и унифицированных функциональных блоков, позволяет сформировать воспроизводимую измерительную среду и снизить влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на результаты измерений.

Особое внимание уделено вопросам обеспечения стабильности электрических соединений, согласования и минимизации потерь в тракте передачи сигнала. Рассматриваются подходы к унификации измерительной оснастки, включая применение прижимных

устройств и модульных решений, направленных на повышение точности и повторяемости измерений.

Ключевые слова: СВЧ КИТ, измерения, СВЧ-переходы, измерительная оснастка, разъемы, метрология.

Bril D.S.
Technical specialist
LLC «SVCH KIT»
Russia, Moscow
brildima1@gmail.com
Ogurtsova K.M.
General director
LLC «SVCH KIT»
Russia, Moscow
info@svch-kit.ruo

MODULAR PLATFORM «MW KIT» AS A TOOL FOR ENSURING ACCURACY AND REPRODUCIBILITY OF MEASUREMENTS IN THE DEVELOPMENT AND PROTOTYPING OF MICROWAVE RADIO PATHS

Abstract. The paper considers the metrological aspects of the use of the «MW KIT» rapid prototyping system in the development and research of microwave radio paths up to 25 GHz. It is shown that a modular approach to the construction of radio frequency paths based on the use of standardized connecting elements and unified functional blocks makes it possible to create a reproducible measuring environment and reduce the influence of design and operational factors on measurement results.

Special attention is paid to the issues of ensuring the stability of electrical connections, matching and minimizing losses in the path. Approaches to the unification of measuring equipment are considered, including the use of clamping devices and modular solutions aimed at improving the accuracy and repeatability of measurements.

Keywords: MW KIT, measurements, MW-junctions, measuring equipment, connectors, metrology.

Современное развитие радиоэлектронной промышленности сопровождается необходимостью создания и внедрения отечественной сверхвысокочастотной электронной компонентной базы (СВЧ ЭКБ), обеспечивающей технологическую независимость продукции. Одним из ключевых факторов успешной разработки СВЧ-устройств является обеспечение высокой точности и достоверности измерений их параметров на всех этапах жизненного цикла – от макетирования до серийного производства.

Измерения в СВЧ-диапазоне предъявляют повышенные требования к метрологическому обеспечению, поскольку даже незначительные конструктивные особенности измерительного тракта могут существенно влиять на получаемые результаты. Особую роль в этом играют соединительные элементы – СВЧ-переходы, разъёмы и способы организации электрического контакта, которые определяют уровень согласования, величину потерь и

стабильность характеристик тракта. Нестабильность или несовершенство таких элементов приводит к увеличению погрешности измерений и снижению воспроизводимости результатов.

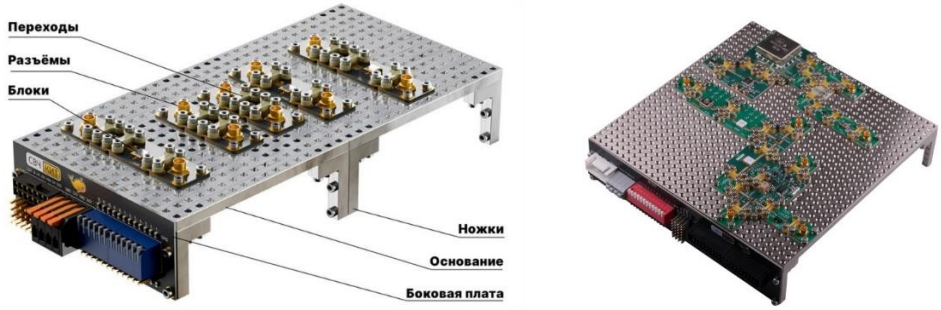
Традиционный подход к экспериментальной отладке СВЧ-устройств основан на разработке индивидуальной измерительной оснастки для каждого изделия, что сопровождается значительными временными и материальными затратами. Кроме того, отсутствие унификации в конструкции отдельных блоков СВЧ-тракта затрудняет или делает невозможным их дальнейшее совместное использование.

В этих условиях особую актуальность приобретает применение унифицированных модульных решений, обеспечивающих воспроизводимость измерительной среды, многократное переиспользование и накопление технического задела и его эффективное применение в последующих работах. Одним из таких решений является система быстрого прототипирования «СВЧ КИТ», представляющая собой модульную платформу для построения СВЧ-трактов до 25 ГГц с использованием стандартизированных функциональных блоков и соединительных элементов.

Целью данной работы является анализ метрологических аспектов применения системы «СВЧ КИТ» при разработке СВЧ ЭКБ, с акцентом на влияние СВЧ-переходов, разъёмов и конструктивных решений на точность и воспроизводимость измерений.

Система «СВЧ КИТ» как унифицированная измерительная среда

Система быстрого прототипирования «СВЧ КИТ» представляет собой модульную платформу, предназначенную для построения и исследования СВЧ-трактов с использованием унифицированных функциональных блоков и соединительных элементов [3]. Конструктивно платформа реализована в виде секционного основания, на котором размещаются СВЧ-блоки, разъёмы и переходы, обеспечивающие формирование требуемой конфигурации тракта. В качестве примера внешнего вида системы на рисунке 1 представлен комплект СВЧ КИТ «Системы радиолокации», представляющий собой один канал приёмо-передающего тракта АФАР.



а) *б)*

Рис. 1. Общий вид платформы быстрого прототипирования СВЧ КИТ: а – состав платформы; б – комплект «Системы радиолокации»

Ключевой особенностью системы является использование стандартизированных СВЧ интерфейсов и блоков, позволяющих собирать различные конфигурации трактов без разработки индивидуальной печатной платы.

Таким образом, система «СВЧ КИТ» может рассматриваться не только как инструмент прототипирования, но и как средство формирования стандартизированной измерительной среды, обеспечивающей повышение точности и воспроизводимости СВЧ-измерений.

СВЧ-переходы в системе «СВЧ КИТ»

СВЧ-переходы являются ключевым элементом модульных измерительных систем, обеспечивающим электрическое соединение функциональных блоков тракта. В отличие от традиционных кабельных соединений, применение компактных печатных переходов позволяет формировать тракт с минимальной длиной соединений, что особенно важно в СВЧ-диапазоне, где даже небольшие паразитные элементы могут оказывать заметное влияние на характеристики сигнала.

Основной задачей СВЧ-переходов является обеспечение согласованного соединения между элементами тракта с минимальными вносимыми потерями и отражениями. Это достигается за счёт контролируемой геометрии проводящих дорожек, стабильного волнового сопротивления и минимизации переходных неоднородностей. В условиях измерений такие переходы позволяют снизить влияние соединительных элементов на результаты и обеспечить более точную оценку характеристик исследуемых устройств.

В системе «СВЧ КИТ» СВЧ-переходы реализованы в виде гибких печатных плат, обеспечивающих соединение модулей в диапазоне частот до 25 ГГц. Конструкция переходов обеспечивает возможность их многократного использования без ухудшения характеристик, что является важным преимуществом с точки зрения воспроизводимости измерений.

На рисунке 2 представлен типовой СВЧ-переход, используемый для соединения элементов платформы «СВЧ КИТ». Видно, что конструкция перехода обеспечивает компактное и симметричное соединение, минимизируя длину сигнального пути и паразитные эффекты.



Рис. 2. СВЧ-переход CT-RFB1 для соединения модулей системы «СВЧ КИТ»

В целях определения параметров СВЧ-переходов был проведён эксперимент. Собрано два СВЧ-тракта с микрополосковыми линиями передачи одинаковой длины (6 единиц в системе СВЧ КИТ). Первый тракт из одной платы длиной 6 единиц, его матрица рассеяния – референсная (ref). Второй – из двух плат по 3 единицы с СВЧ-перемычкой CT-RFB1 посередине. СВЧ-переход – это измеряемое устройство, измеренная матрица рассеяния обозначается DUT. Фотография обоих трактов представлены на рисунке 3.

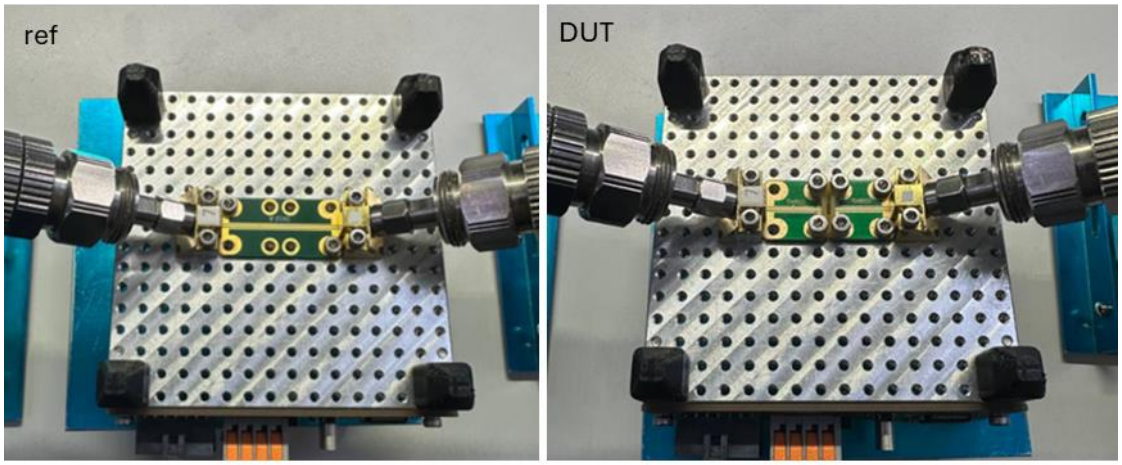


Рис. 3. СВЧ-переход CT-RFB1 для соединения модулей системы «СВЧ КИТ»

Каждый тракт был подключен к векторному анализатору цепей и измерены его S-параметры. Затем с помощью стандартной процедуры деэмбеддинга через Т-матрицы, получены параметры СВЧ-перехода (рис. 4).

На рисунке 4 представлены данные измерения S-параметров с использованием данного перехода и без него [1].

Потери в переходах не превышают 0,01 дБ в диапазоне до 7 ГГц и 0,5 дБ в диапазоне до 25 ГГц. При этом коэффициент стоячей волны (КСВ) перехода не превышает 1,2 в диапазоне до 7 ГГц и 2,0 в диапазоне до 25 ГГц, что свидетельствует о хорошем согласовании и низком уровне отражений.

Таким образом, СВЧ-переходы в системе «СВЧ КИТ» выполняют не только функцию соединения элементов, но и являются важным инструментом формирования стабильной и воспроизводимой измерительной среды, обеспечивающей снижение погрешностей и повышение достоверности результатов измерений.

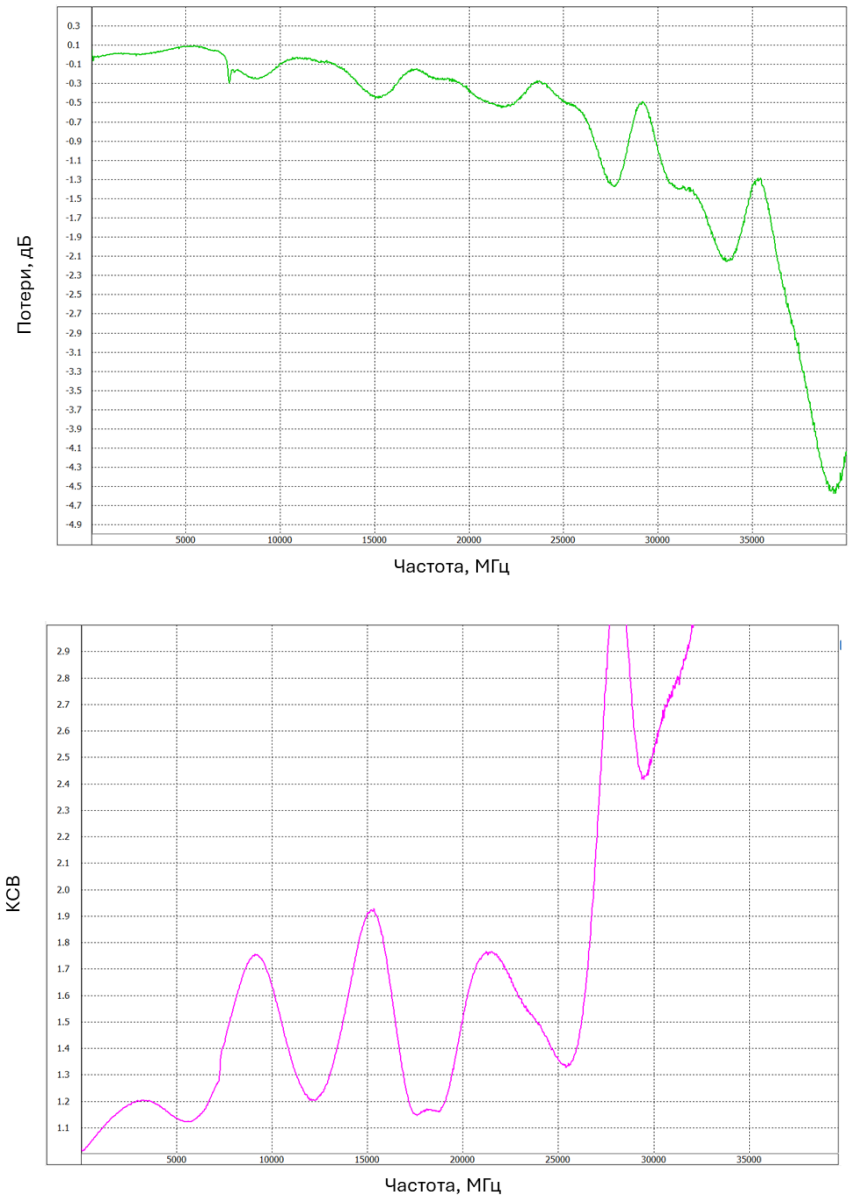


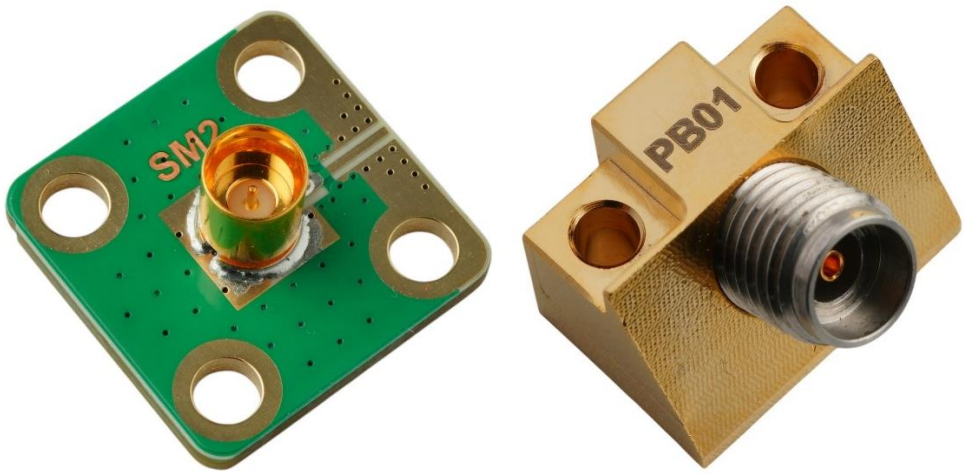
Рис. 4. Результаты измерений харктеристик СВЧ-перехода, полученные при помощи деембединга

СВЧ-разъемы в системе «СВЧ КИТ»

СВЧ-разъёмы являются важным элементом измерительных трактов, обеспечивающим подключение исследуемых устройств к внешнему измерительному оборудованию. Их конструктивные особенности оказывают непосредственное влияние на стабильность электрического контакта, согласование тракта и, как следствие, на точность проводимых измерений.

В системе «СВЧ КИТ» используются два основных типа СВЧ-разъёмов, различающихся способом подключения к функциональным блокам.

К первому типу относятся разъёмы, присоединяемые с использованием СВЧ-переходов. Такие разъёмы удобны с точки зрения компоновки измерительных схем и позволяют гибко конфигурировать тракт. На рисунке 5а представлен блок с быстросъемным СВЧ-разъёмом типа SMP, позволяющим производить быструю коммутацию, т.к. не обладает резьбовым соединением.



а) *б)*

Рис. 5. Типы СВЧ-разъёмов в СВЧ КИТ:
а – СВЧ-блок с SMP-разъёмом CT-SM2-0303 до 20 ГГц; б – SMA-разъём (2,92 мм) угловой прижимной T-PB01-0203

Ко второму типу относятся разъёмы, реализующие прямой контакт с проводящими дорожками функционального блока. В этом случае исключается промежуточный переходной элемент, что позволяет сократить длину сигнального пути и уменьшить количество неоднородностей в тракте. Такой подход обеспечивает более стабильные электрические параметры соединения и позволяет достигать лучших характеристик в более широком частотном диапазоне. Однако, прижимная конструкция разъема предполагает использование динамометрического ключа для обеспечения необходимого крутящего момента затяжки его установочных винтов. На рисунке 5б представлен прижимной СВЧ-разъём типа SMA (2,92) с прямым подключением к дорожкам блока [2].

С точки зрения метрологии, выбор типа разъёма определяется требованиями к точности измерений и рабочему диапазону частот. Использование разъёмов с прямым контактом предпочтительно в задачах, где необходимо минимизировать влияние соединительных элементов на измеряемые параметры, в то время как быстросъёмные разъёмы обеспечивают большую гибкость и удобство при построении экспериментальных схем.

Таким образом, применение различных типов СВЧ-разъёмов в системе «СВЧ КИТ» позволяет балансировать между удобством компоновки и метрологическими характеристиками измерительного тракта, обеспечивая адаптацию системы под конкретные задачи разработки и исследований.

Использование прижимных устройств в системе «СВЧ КИТ»

Одним из важных направлений применения системы «СВЧ КИТ» является измерение параметров кристаллов и корпусированных микросхем с использованием прижимных устройств. Данный подход позволяет отказаться от разработки индивидуальной измерительной оснастки для каждого типа изделия и перейти к использованию унифицированных плат и механических решений [4].

Прижимные устройства представляют собой конструкцию, обеспечивающую надёжный электрический контакт между измеряемой микросхемой и проводящими дорожками заранее изготовленной платы. Такие платы разрабатываются в формате «СВЧ КИТ» и устанавливаются на секционное основание платформы, что обеспечивает их совместимость с остальными элементами системы и позволяет включать их в состав измерительного тракта.

На рисунке 6 показан пример платы с установленным прижимным устройством, закреплённой на секционном основании «СВЧ КИТ».

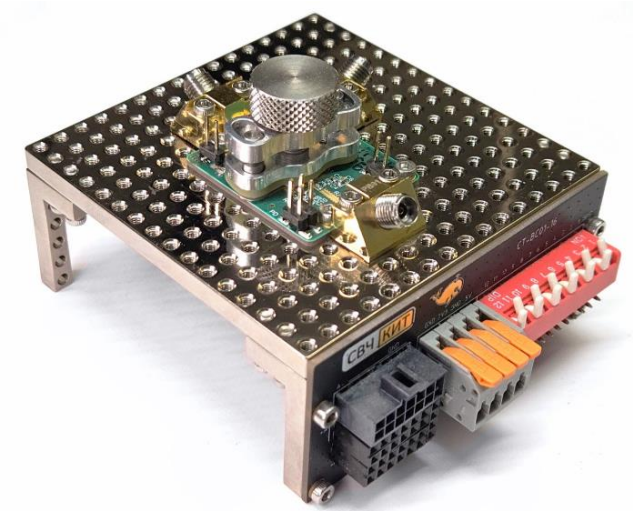


Рис. 6. Плата с прижимным устройством для измерения микросхем, установленная на платформе «СВЧ КИТ»

Использование прижимных устройств позволяет существенно упростить процесс измерений при работе с большим количеством микросхем. Замена исследуемых образцов осуществляется без демонтажа всей измерительной схемы, что значительно сокращает время проведения испытаний и повышает их эффективность. При этом сохраняются неизменными геометрия тракта и условия подключения, что положительно сказывается на воспроизводимости результатов.

С метрологической точки зрения важным преимуществом данного подхода является снижение влияния нестабильности контактных соединений. Контролируемое усилие прижима обеспечивает повторяемость электрического контакта, что уменьшает разброс измеряемых параметров и снижает дополнительную погрешность, связанную с переходным сопротивлением.

Кроме того, использование унифицированных измерительных плат в сочетании с прижимными устройствами позволяет стандартизировать процедуру испытаний, обеспечивая сопоставимость результатов при измерении различных партий микросхем. Это особенно важно при проведении серийных испытаний и сравнительном анализе характеристик изделий.

Таким образом, применение прижимных устройств в системе «СВЧ КИТ» обеспечивает повышение производительности измерений, улучшение воспроизводимости результатов и снижение метрологических погрешностей, что делает данный подход эффективным инструментом при разработке и тестировании СВЧ ЭКБ.

Рассмотрены метрологические аспекты применения системы быстрого прототипирования «СВЧ КИТ» при разработке сверхвысокочастотной электронной компонентной базы. Показано, что использование модульного подхода к построению трактов позволяет сформировать унифицированную измерительную среду, обеспечивающую повышение точности и воспроизводимости результатов измерений.

Особое внимание уделено роли соединительных элементов – СВЧ-переходов и разъёмов, которые оказывают существенное влияние на характеристики измерительного тракта. Применение стандартизированных переходов с контролируемыми параметрами, а также выбор оптимального типа разъёмов позволяют минимизировать вносимые потери, улучшить согласование и снизить уровень отражений, что непосредственно влияет на достоверность измерений.

Дополнительным фактором повышения метрологической надёжности является использование прижимных устройств и унифицированных измерительных плат, обеспечивающих стабильность электрического контакта и повторяемость условий проведения испытаний. Это особенно важно при измерении большого количества микросхем и проведении сравнительных исследований.

Таким образом, система «СВЧ КИТ» может рассматриваться не только как инструмент быстрого прототипирования, но и как эффективное средство повышения качества СВЧ-измерений. Её применение способствует снижению погрешностей, уменьшению влияния человеческого фактора и ускорению процессов разработки и внедрения отечественной СВЧ ЭКБ.

Список литературы

1. Деембединг СВЧ-переходов CT-RFB: [сайт].- 2026. URL: http://www.qrz.ru/articles/article260.html (дата обращения:29.04.2026).

2. «СВЧ КИТ»: [сайт].- 2026. URL: https://svch-kit.ru/ (дата обращения:29.04.2026).

3. Гаранович Д.И. Быстрое прототипирование СВЧ-трактов на отечественной ЭКБ с помощью системы «СВЧ КИТ»/ Д.И. Гаранович, О.В. Григорьев // СВЧ-электроника. – 2025. – №4. – С. 52–54.

4. Разработка печатных плат «СВЧ КИТ» : База знаний «СВЧ КИТ»: [сайт].- 2026. URL: https://wiki.svch-kit.ru/xwiki/bin/view/Rukovodstva/Razrabotka-pechatnykh-plat-SVCH-KIT/ (дата обращения:29.04.2026).

Коновалова Е.В.
студент
Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)
Россия, Москва
eugenia0604@mail.ru
Хомутова Е.Г.
к.х.н., доцент кафедры «Метрология и стандартизация»
Российский технологический университет (РТУ МИРЭА)
Россия, Москва
khomutova@mail.ru

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ГОТОВЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ

Аннотация. В статье показано, что визуализация результатов применением контрольных карт позволяет осуществить наглядный мониторинг одновременно по нескольким показателям размеров изделия сложной геометрической формы для контроля изготавливаемой продукции и позволяет управлять качеством процессов и изделий, что становится актуальным на предприятиях и обеспечивает устойчивое развитие отрасли машиностроения.

На примере применения контрольных карт средних по результатам метрологического контроля путем 3D-сканирования лопаток для турбин найдены признаки нестабильности процесса изготовления и обозначены пути их преодоления. Для решения задач выявления отклонения размеров от нормы для изделий сложной формы применена технология 3D-технология сканирования. Это инструмент, который позволяет быстро и с высокой надежностью и точностью получить информацию о процессе производства, значительно сокращает время и повышает качество контроля отклонений геометрии с точностью до микрон, что особенно важно для серийного производства с высокими требованиями. Построение контрольных карт средних, одновременно совмещая несколько показателей размеров изделия сложной формы, визуально показывает проблемы обработки изделий и помогает выявить участки, требующие повышенного внимания и коррекции.

Ключевые слова: контрольные карты, мониторинг качества, изделия сложной конфигурации, визуализация проблем.

Konovalova E.V.
Student
Russian Technological University (RTU MIREA)
Russia, Moscow
eugenia0604@mail.ru

Khomutova E.G.
Candidate of Sciences in Chemistry, Associate Professor
of the Department of Metrology and Standardization
Russian Technological University (RTU MIREA)
Russia, Moscow
khomutova@mail.ru

MONITORING THE QUALITY OF FINISHED PRODUCTS BASED ON CONTROL CHARTS

Abstract. The article demonstrates that visualization of results using control charts allows for visual monitoring of several dimensions of a product with a complex geometric shape simultaneously to control manufactured products and allows for quality management of processes and products, which is becoming relevant in enterprises and ensures sustainable development of the mechanical engineering industry.

Using an example of using control charts based on average metrological control results obtained through 3D scanning of turbine blades, we identified signs of manufacturing process instability and identified ways to overcome them. 3D scanning technology was used to identify dimensional deviations from standard specifications for complex-shaped parts. This tool enables rapid, reliable, and accurate acquisition of information about the manufacturing process, significantly reducing time and improving the quality of geometric deviation control with micron accuracy, which is especially important for high-demand mass production. Constructing control charts of averages, simultaneously combining several dimensions of a complex-shaped product, visually reveals problems in product processing and helps identify areas requiring increased attention and correction.

Keywords: control charts, quality monitoring, complex products, problem visualization.

Контроль геометрических размеров изделий машиностроения – один из важных этапов современного производства деталей сложной формы. Качество контроля изделий машиностроения и производственного процесса играют решающую роль, поскольку от точности размеров и формы деталей зависят их работоспособность, безопасность, срок службы. [1, 2].

Целью данной работы является анализ стабильности процесса изготовления изделий сложных геометрических конфигураций и практики применения контрольных карт по результатам метрологического контроля путем 3D-сканирования, которые становятся инструментом современного производства. Для решения подобных задач нужен инструмент, который позволяет быстро и с высокой надежностью и точностью получить информацию о процессе производства, значительно сокращает время и повышает качество контроля отклонений геометрии с точностью до микрон, что особенно важно для серийного производства с высокими требованиями.

Актуальность работы обусловлена тем, что контрольные карты (КК) успешно используются в различных отраслях, в том числе машиностроении. При этом они не всегда справляются с задачами, которые ставит перед инженерами современное цифровое производство. Интерпретация КК представляет собой системную проблему, связанную с пониманием процессов сотрудниками.

Методология. 3D-сканеры – это средства измерений, которые выдают информацию о реальных объектах для ее обработки с использованием цифровых технологий. Они измеряют точки на поверхности высокой плотностью, что дает существенно больше информации по сравнению с традиционными средствами измерения (рис. 1) [3]. На измерительные системы с технологиями 3D-сканирования установлены метрологические требования: ГОСТ Р 8.1030-2024 [4].

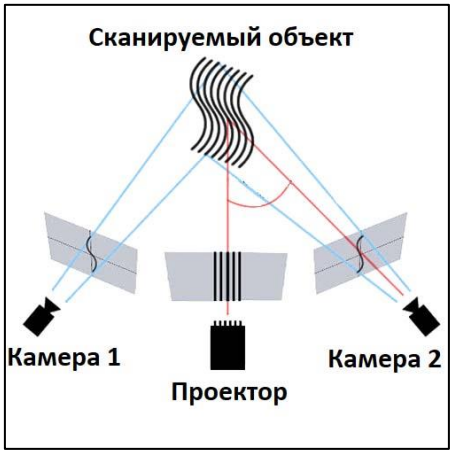


Рис. 1. Принципиальная схема сканирования объекта

Контроль геометрических размеров объектов сложных форм путем 3D сканирования обладает рядом основных принципиальных преимуществ [5].

1. Возможность контроля геометрических параметров изделий со сложной кривизной поверхностей.
2. Скорость и автоматизация получения и анализа данных. На измерение одного небольшого объекта требуется около 1 минуты, тогда как традиционные координатно-измерительные машины требуют часы для полной проверки сложной детали. Программное обеспечение анализирует соответствие допускам и выдает отчеты с указанием отклонений.
3. Точность 3D сканирования является важнейшим параметром для результатов метрологических оценок и составляет до 5 мкм.

Результаты. В данной работе использовали оптический 3D-сканер RangeVision PRO, который разработан в России и одобрен Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии как средство измерений. RangeVision PRO контролирует геометрию и получает точные 3D-данные без контакта с объектами. В результате получаются 3D-изображения, так называемые цветовые карты отклонений в каждой точке проверяемой поверхности от заданной (рис. 2).

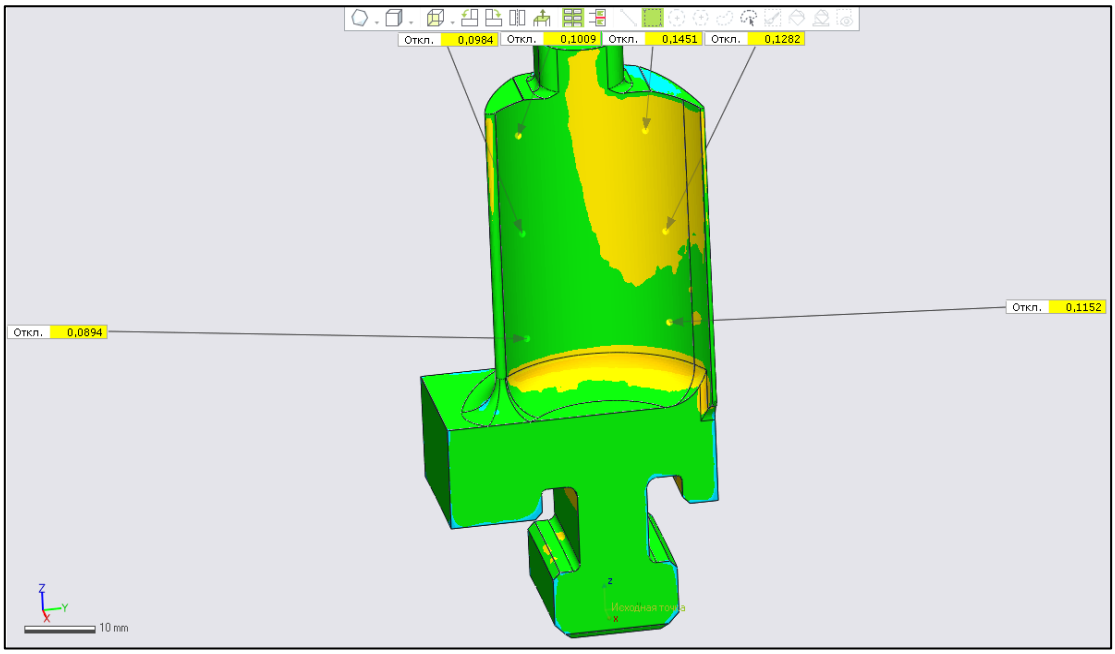


Рис. 2. Карта отклонений размеров лопатки, построенная по результатам 3D-сканирования. Показана шкала величин отклонений

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений от ±0,040 до ±0,024, мм.

Процесс контроля изделий состоит из несколько этапов.

1. Подготовка объекта к сканированию: поверхность очищается; если требуется, наносятся маркеры.

2. Процесс 3D-сканирования. На поверхность детали проецируются лазерные линии или структурированная световая сетка (в зависимости от типа сканера). Камеры 3D-сканера формируют облако из миллионов точек, передающих геометрию объекта.

3. Обработка данных. Программное обеспечение визуализирует расхождения по размерам, плоскостям и т.д. Изделие (деталь) проверяется на отклонения в заданных точках.

4. Нанесение отклонений на контрольные карты и их анализ. Результаты анализа используют при оформлении сертификата качества изделий.

Последний этап рассмотрим более детально.

Анализ применения контрольных карт при технологии 3D-сканирования, которое применяется при контроле качества геометрических форм, провели на примере лопатки для турбины. Лопатка является составной частью турбин, поэтому от её формы и зависит работоспособность всей турбины. Лопатка схематично представлена на рис 3. Контролируемые параметры лопатки: габаритные размеры; посадочные размеры; геометрия пера.

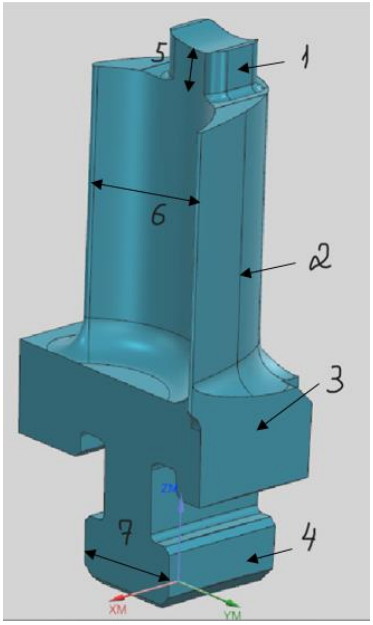


Рис. 3. Рабочая лопатка для турбины:
1 – шип, 2 – профильная часть, 3 – нижняя полка, 4 – хвостовик,
5 – высота шипа, 6 – бок, 7 – пазик

После выполнения всех типов обработки изделия контролировали партии, каждая из которых изготовлена в течение недели, и проводили испытание геометрии пера – 3D-сканированием.

Карта отклонений размеров лопатки, построенная по результатам 3D-сканирования представлена на рис. 3. На рисунке видны точки, в которых установлены отклонения и их показаны численные величины отклонений.

На примере конкретного процесса изготовления лопаток для турбин, было рассмотрено, как строить и интерпретировать КК. Контрольные карты – технически простой инструмент управления качеством, который позволяет оперативно выявлять отклонения в геометрических параметрах готовых изделий [6]. Он требует понимания процесса производства в сочетании с дополнительным анализом данных и не поддается полностью алгоритмизации [7].

Контрольные карты для измерения профиля лопатки – это специализированные инструменты и методики, используемые в производстве для обеспечения точности размеров и формы лопатки путем сравнения измеренных данных с цифровой моделью и заданными допусками, что позволяет выявлять отклонения, контролировать качество на разных этапах и повышать надежность турбины.

Для визуального мониторинга и управления процессом во времени были построены контрольные карты для трех параметров: размер пазика, размер бока и высота шипа (рис. 4). Полученные для построения контрольных карт средние значения, стандартные отклонения и контрольные границы представлены в таблице.

Таблица

Результаты расчета контрольных и предупредительных границ контрольных карт, см

Контролируемый размер	Сред-нее	Предупредительные границы		Контрольные границы	
		LPL	UPL	LCL	UCL
Размер изделия (пазик)	5,02	5,00	5,04	4,99	5,06
Размер изделия (бок)	37,95	37,89	38,01	37,86	38,04
Размер изделия (высота шипа)	6,65	6,63	6,72	6,55	6,75

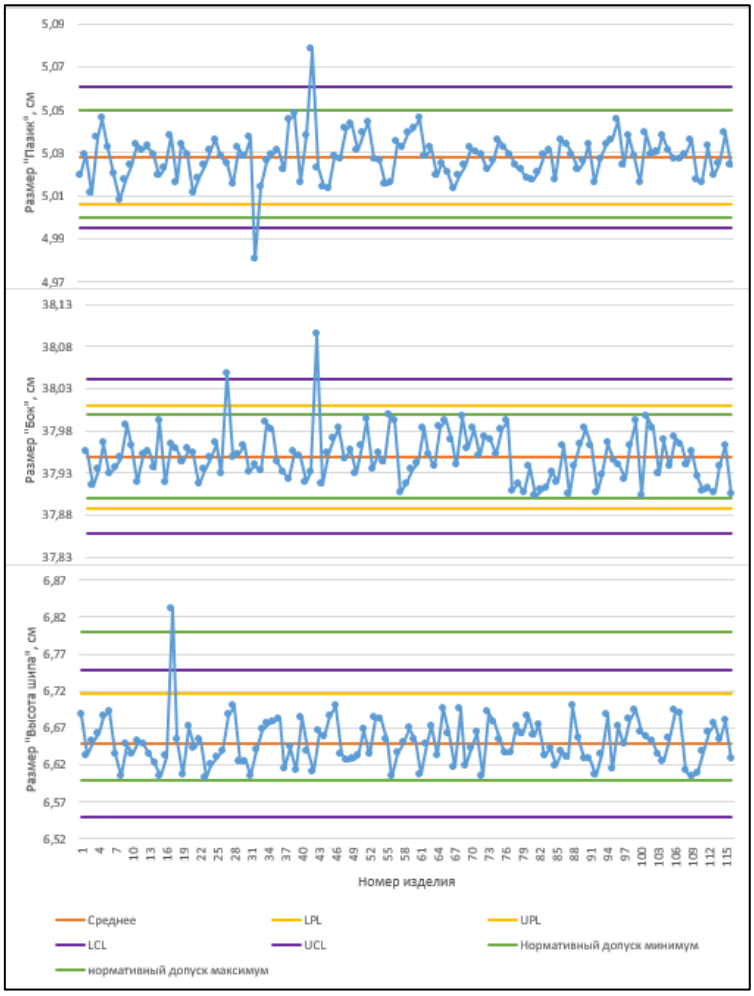


Рис. 4. Контрольная карта средних по трем показателям: a – «размер пазика», норматив 5,00 + 0,05; b – «размер бока», норматив 38,0 −0,1; c – «высота шипа», норматив 6,7 ±0,1

Поскольку пригодность лопатки характеризуют по нескольким геометрическим размерам одновременно, предложено строить КК средних размеров также по нескольким размерам, совмещая их в одном рисунке. Это дает возможность анализировать ход процесса изготовления изделий визуально и более наглядно видеть проблемные участки процесса.

Анализ рис. 4 показывает признаки нестабильности процесса изготовления (проблемные зоны показаны красным):

1) Выход за норматив и контрольные границы выявлен: КК a – «размер пазика» – 3 случая, точки 32, 39 и 42; КК b – «размер шипа» – 1 случай, точка 17; КК c – «размер бока» – 2 случая, точки 26 и 42.

2) Приближение к контрольным пределам: КК a – «размер пазика» – точка 39.

3) Наблюдается устойчивая тенденция смещения значений показателя в одну сторону от центральной линии, процесс начал «дрейфовать»: 5 точек подряд снижают значения КК c – «размер бока» – точки 33-37.

4) 9 точек подряд находятся под средней линией: КК c – «размер бока» – точки 77-85.

Такие признаки указывают на нестабильность процесса, наличие специальной причины вариации, связанной, например, сбоем в работе оборудования. В этом случае процесс признаётся нестабильным, его необходимо остановить, провести расследование причин и выполнить корректирующие действия, прежде чем возобновлять серийное производство.

Появление признаков 1 и 2 интерпретируется как сигнал о том, что измеряемый параметр вышел за пределы контрольных границ. Изделия номер 17, 26, 32, 39 и 42 необходимо изъять для дальнейшей полировки до нормы.

Признаки 3 и 4 свидетельствуют о появлении нестабильности, связанной с изменением одного или нескольких факторов процесса (настройка, износ оборудования), и указывает на необходимость проведения расследования причин и корректирующих действий для восстановления статистической управляемости, включая проверку работы измерительного оборудования, программного обеспечения и внешних периодических воздействий.

Из рисунка 4 видно, что проблемные зоны, на контрольных картах a и c совпадают, что указывает на систематический характер нарушений в определённых участках процесса. Это позволяет предположить наличие структурной причины, связанной с оборудованием, программным обеспечением или технологией, а не с разовыми случайными факторами. На контрольной карте b проблемные зоны появляются раньше, чем зафиксированы на картах a и c. По-видимому, отклонения «размера бок» предшествуют и предупреждают о возникновении нестабильности процесса по другим показателям, например «размер пазика» и «размер бока».

Построение КК средних, одновременно совмещая несколько показателей размеров изделия сложной формы, визуально показывает проблемы обработки изделий и помогает выявить участки, требующие повышенного внимания и коррекции.

Таким образом, визуализация результатов применением контрольных карт позволяет осуществить наглядный мониторинг одновременно по нескольким показателям изделия сложной геометрической формы для контроля изготавливаемой продукции и позволяет управлять качеством процессов и изделий, что становится актуальным на предприятиях. устойчивое развитие отрасли машиностроения.

Список литературы

1. Иванов А.А. Современные методы 3D-сканирования в машиностроении. / А.А. Иванов – Москва : Машиностроение, 2021. – 320 с.

2. Chen X., Wang J. Reverse Engineering and 3D Scanning: A Review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 118. pp. 85-89.

3. Лошак А.В. Метрологические 3D-сканеры для промышленности: контроль геометрии и точность измерений. / А.В. Лошак // Мир измерений. 2026. №4. – С. 71-76.

4. ГОСТ Р 8.1030-2024 Государственная система обеспечения единства измерений. Классификация средств измерений. Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2021. – 65 с.

5. Печенина Е.Ю., Печенин В.А., Болотов М.А. Модель анализа результатов сканирования геометрии сопловых аппаратов турбин. / Е.Ю. Печенина, В.А. Печенин, М.А. Болотов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2020. № 63. – С.61-69.

6. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. Москва : ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 46 с.

7. Шпер В.Л., Шереметьева С.А., Смелов В.Ю., Хунузиди Е.И. Контрольные карты Шухарта – простой, но не лёгкий для применения инструмент анализа данных. / В.Л. Шпер, С.А. Шереметьева, В.Ю. Смелов, Е.И. Хунузиди // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2024. № 67(1) – С.121-131.

Мотлич П.А.
к.т.н., начальник лаборатории
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Россия, Мытищи
mp.gnmc@mail.ru
Малахов А.В.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
sanya-mal1@yandex.ru
Павлова О.В.
старший научный сотрудник
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России
Россия, Мытищи
mp.gnmc@mail.ru

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ: ОТ ВЕРИФИКАЦИИ К УПРАВЛЕНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Аннотация. Рассмотрены подходы к количественной оценке достоверности цифровых двойников сложных технических изделий. Показано, что традиционные методы верификации и валидации, дающие бинарный ответ об адекватности модели, недостаточны для задач экстраполяции за пределы области валидации и работы в условиях ограниченных экспериментальных данных. Обоснован переход от бинарной верификации к управлению неопределенностью прогнозов как методологической основе для разработки и дальнейшего применения доверенных цифровых двойников. Предложены основные методы количественной оценки неопределённости: байесовская калибровка параметров, вероят-

ностное моделирование неоднородности характеристик, ансамблевые подходы для сложных нелинейных моделей, байесовские нейросети для разделения алеаторной и эпистемической неопределённости. Сформулирована концепция «цифрового паспорта доверия», представляющего собой структурированный набор метаданных, содержащего информацию об области валидации, оценках неопределённости и границах применимости модели. Приведены краткие рекомендации по нормативному, инструментальному и кадровому обеспечению внедрения подходов. Показана экономическая эффективность предлагаемого подхода, выражающаяся в сокращении объёма натурных испытаний и снижении рисков.

Ключевые слова: цифровые двойники, управление неопределенностью, верификация, валидация, достоверность, байесовская калибровка, вероятностное моделирование, ансамблевые методы, байесовские нейросети, цифровой паспорт доверия.

Motlich P.A.
Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory
FSBI «MSMC» Russian Ministry of Defense
Russia, Mytishi
mp.gnmc@mail.ru
Malahov A.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
sanya-mal1@yandex.ru
Pavlova O.V.
Senior researcher
FSBI «MSMC» Russian Ministry of Defense
Russia, Mytishi
mp.gnmc@mail.ru

ASSESSMENT OF DIGITAL TWIN CREDIBILITY: FROM VERIFICATION TO UNCERTAINTY MANAGEMENT

Abstract. Approaches to quantitative assessment of reliability of digital twins of complex technical products are considered. It has been shown that traditional verification and validation methods that give a binary answer about the adequacy of the model are insufficient for extrapolation tasks outside the scope of validation and work in conditions of limited experimental data. The transition from binary verification to uncertainty management of forecasts as a methodological basis for the development and further use of trusted digital twins is justified. The main methods for quantitative estimation of uncertainty are proposed: Bayesian calibration of parameters, probabilistic modeling of heterogeneity of characteristics, ensemble approaches for complex nonlinear models, Bayesian neural networks for separating aleatory and epistemic uncertainty. The concept of a «digital trust passport» is formulated, which is a structured set of metadata containing information about the scope of validation, estimates of uncertainty and boundaries of applicability of the model. Brief recommendations on regulatory, instrumental and personnel support for the implementation of approaches are provided. The economic efficiency of the proposed approach is shown, which is expressed in reducing the volume of field tests and reducing risks.

Keywords: digital twins, uncertainty management, verification, validation, reliability, Bayesian calibration, probabilistic modeling, ensemble methods, Bayesian neural networks, digital trust passport.

Цифровые двойники сегодня – это уже не просто современное словосочетание, а реальный инструмент, без которого трудно представить разработку перспективных и эксплуатацию существующих сложных технических систем и изделий. Они позволяют моделировать поведение продукции на этапах проектирования, производства и эксплуатации, сокращая затраты на натурные испытания и ускоряя принятие решений [1, 2]. Но чем шире применяются цифровые двойники, тем острее встаёт вопрос о том, можно ли им доверять. По оценкам экспертов, до 30% бюджета сложных проектов тратится на избыточные натурные испытания именно из-за недоверия к моделям. И это не просто цифры – это реальные ресурсы, которые можно было бы направить на развитие.

Классическая верификация даёт ответ: «модель адекватна» или «не адекватна». Для инженера этого часто недостаточно. За таким ответом теряются важные нюансы: ошибка в 1% или в 20%? В каких режимах можно полагаться на прогноз? Что делать, если натурных испытаний мало или они вообще невозможны – например, при прогнозировании поведения в экстремальных условиях? Без количественной оценки доверия цифровой двойник рискует остаться непригодным для практических решений [3, 4].

Цель статьи – предложить научно обоснованные подходы к оценке достоверности цифровых двойников, основанные на концепции неопределённости. Будет показано, как переход от простого вопроса «адекватна ли модель?» к управлению неопределённостью повышает эффективность использования цифровых моделей. Также будут рассмотрены необходимые методы, инструменты и нормативные изменения.

Согласно сложившейся практике, закреплённой в международных стандартах, верификация отвечает на вопрос «правильно ли построена модель?». Она проверяет, что программный код корректно воспроизводит заложенное математическое описание, без ошибок реализации и дискретизации. Валидация же даёт ответ на вопрос «та ли модель построена?» – насколько точно рассчитанные с её помощью параметры соответствуют поведению реального объекта в тех условиях, где проводились натурные эксперименты [5]. Если верификация гарантирует отсутствие ошибок в «переводе» математики в код, то валидация подтверждает, что сама математическая модель адекватно описывает физику.

Основные ограничения классической верификации можно свести к четырём пунктам.

1) Экстраполяция за пределы валидации. Модель может быть валидирована в ограниченном диапазоне условий (например, при комнатной температуре), но применяться – за его пределами (например, для прогнозирования поведения при экстремальных температурах). Бинарный подход не даёт

инструментов для оценки рисков такой экстраполяции [6]. Пользователь модели остаётся в неведении: насколько можно доверять прогнозу в условиях, не охваченных валидационными экспериментами?

2) Ограниченность экспериментальных данных. Натурные испытания дороги, а для сложных технических систем – часто единичны. Набор точек валидации может составлять от нескольких единиц до нескольких десятков. Статистическая значимость бинарного вывода «модель адекватна» при малом объёме выборки низка. Фактически, можно утверждать лишь то, что модель не противоречит имеющимся данным, но не то, что она будет адекватна в других условиях [7, 8, 9, 10].

3) Неопределённость входных данных. Реальные изделия имеют разброс характеристик: механические свойства материалов, геометрические размеры, условия эксплуатации. В детерминированных моделях эти разбросы не учитываются, что приводит к иллюзии точности: модель даёт одно точечное значение, в то время как реальный объект демонстрирует спектр возможных состояний [8].

4) Неучтённые физические эффекты. Любая математическая модель содержит упрощения: линейная аппроксимация нелинейных процессов, пренебрежение второстепенными факторами, идеализация граничных условий. Вклад этих упрощений в ошибку прогноза редко оценивается количественно.

Современный подход, активно развиваемый в аэрокосмической, оборонной и энергетической отраслях, предлагает перейти от бинарного утверждения «модель адекватна» к количественной оценке неопределённости прогноза [4, 6, 11].

Управление неопределенностью (uncertainty quantification, UQ) – это системный подход к идентификации и количественной оценке неопределённости, связанной с моделированием, с последующим использованием этой информации для принятия решений.

Такой переход даёт ряд важных преимуществ. Вместо точечного прогноза пользователь получает доверительный интервал: например, не «давление 320 МПа», а «с вероятностью 95% давление лежит между 273 и 357 МПа». Это позволяет принимать решения с учётом рисков: если нижняя граница интервала всё ещё ниже предела прочности – решение одно, если выше – другое. Появляется возможность сравнивать модели не только по точности, но и по степени неопределённости. И, что особенно важно, становится понятно, какие источники неопределённости самые значимые, а значит, можно планировать дополнительные исследования именно для них.

С метрологической точки зрения цифровой двойник можно рассматривать как особый вид измерительного прибора. В классической метрологии результат физического измерения принято представлять в форме $x \pm U$, где U – расширенная неопределённость, а интервал с заданной доверительной вероятностью накрывает истинное значение. Пользователь датчика знает не только показание, но и то, насколько этому показанию можно доверять.

Для цифрового двойника логика та же, но с двумя принципиальными дополнениями. Во-первых, к традиционным источникам неопределённости (разброс входных параметров, погрешность измерительных данных) добавляются чисто «вычислительные», а именно неточности самой модели и ошибки численных методов. Во-вторых, роль измерительного прибора выполняет не физический датчик, а программный код, реализующий модель.

Поэтому методы управления неопределённостью (UQ) можно рассматривать как расширение классической метрологии на ту область, где «измерение» выполняется расчётными методами с применением программных кодов.

Неопределённость в прогнозах цифрового двойника складывается из нескольких составляющих. Исследователи в области UQ обычно сходятся на том, что все источники можно объединить в три укрупнённые категории (таблица 1): то, что мы неточно задаём на входе (параметры модели), то, что мы упрощаем в физической постановке (сама модель), и то, что мы теряем при численной реализации (вычислительные погрешности) [4, 8, 11].

Таблица 1

Категории источников неопределенности

Группа	Описание	Характер проявления	Примеры
Входная неопределенность	Неопределенность параметров модели, задаваемых пользователем	Алеаторная (стохастическая)	Разброс механических свойств материала, геометрические допуски, вариации условий эксплуатации
Модельная неопределенность	Неопределенность, связанная с упрощениями физической модели	Эпистемическая (связана с недостатком знаний, информации)	Использование линейной модели вместо нелинейной, сеточная дискретизация, пренебрежение второстепенными эффектами
Вычислительная неопределенность	Погрешности численных методов и округлений	Эпистемическая сходимость	Итерационные алгоритмы, точность вычислений, ошибки дискретизации

Важно различать алеаторную и эпистемическую неопределённость. Первую нельзя устранить, но можно описать распределением. Вторую – можно снизить, приложив дополнительные усилия по изучению системы.

Не все источники неопределенности одинаково влияют на выходные параметры модели. Для эффективного управления необходимо выделить наиболее значимые. Прежде чем тратить ресурсы на уточнение всех параметров модели, имеет смысл выяснить, какие из них действительно влияют на результат. Для этого применяют анализ чувствительности. Если зависимости в модели близки к линейным, достаточно оценить частные производные – это так называемый локальный подход.

В более сложных, нелинейных случаях, когда параметры взаимодействуют друг с другом, приходится использовать глобальные методы, например, прогоны по методу Монте-Карло [12].

Анализ вклада в неопределённость позволяет определить, какие источники вносят наибольший вклад в суммарную неопределённость прогноза. Это даёт возможность направить усилия по снижению неопределённости на наиболее значимые факторы.

Для учёта неопределённости входные параметры описываются не точечными значениями, а распределениями вероятностей. Выбор распределения зависит от природы параметра и доступной информации (таблица 2).

Таблица 2

Типы распределения

Тип распределения	Характеристика	Типичное применение
Нормальное (Гаусса)	Симметричное, характеризуется средним и стандартным отклонением	Разброс механических свойств, технологические отклонения
Логнормальное	Положительная асимметрия	Времена до отказа, ресурсные характеристики
Равномерное	Все значения в интервале равновероятны	При отсутствии информации о распределении, экспертные оценки
Треугольное	Линейное возрастание и убывание	Экспертные оценки с указанием наиболее вероятного значения
Бета-распределение	Гибкое, задаётся на конечном интервале	Доли, проценты, ограниченные параметры

Выбор распределения всегда представляет собой компромисс между точностью и доступностью данных. Иногда лучше указать на отсутствие информации и взять равномерное распределение, чем делать вид, что распределение известно, когда это не так.

Прежде чем переходить к детальному рассмотрению, полезно составить общее представление о существующих методах и условиях их применения.

Сводная таблица 3 позволяет сориентироваться в основных подходах.

Таблица 3

Методы расчета распределения

Метод	Что даёт	Когда применять
Байесовская калибровка	Апостериорные распределения параметров	Есть немного экспериментальных данных, нужно их объединить с априорной информацией
Вероятностное моделирование	Распределение выходных параметров	Есть статистика входных данных, нужно оценить разброс результатов
Ансамблевые методы	Оценка неопределённости сложных моделей	Аналитическая оценка затруднена, есть несколько вариантов модели
Байесовские нейросети	Разделение алеаторной и эпистемической неопределённости	В модели есть компоненты искусственного интеллекта, важна интерпретация источников неопределённости

1) Байесовская калибровка.

Работает по принципу «знания до опыта плюс опыт дают знания после опыта». Исходные представления о параметрах модели (например, что предел текучести лежит в интервале от 300 до 400 МПа) оформляются в виде априорных распределений. Источники таких представлений могут быть разными: паспортные данные материалов, статистика по аналогам, мнение экспертов. Если ничего не известно, честно задаётся равномерное распределение в разумных пределах [3].

Затем эти представления сопоставляются с экспериментальными данными. Строится функция правдоподобия – по сути, мера того, насколько хорошо модель с теми или иными параметрами предсказывает результаты опытов.

На финальном этапе априорные знания и данные объединяются по формуле Байеса. В результате получаются апостериорные распределения – «уточнённые» представления о параметрах, которые уже учитывают проведённые эксперименты.

2) Вероятностное моделирование.

Предположим, известно, что предел текучести материала может меняться от образца к образцу на 15%. В детерминированной модели обычно берётся среднее значение, что даёт один точечный прогноз. Однако в реальности поведение партии из ста изделий будет демонстрировать разброс.

Вероятностное моделирование позволяет учесть этот разброс. Вместо одного расчёта выполняется множество (от тысячи до десятков тысяч), причём значения параметров в каждом расчёте выбираются из заданных распределений. В результате получается распределение выходных параметров, например максимальных напряжений.

3) Ансамблевые методы.

В случаях, когда аналитическая оценка неопределенности затруднена, например, для сильно нелинейных моделей или моделей, включающих компоненты искусственного интеллекта, применяются ансамблевые подходы.

Идея заключается в использовании не одной, а нескольких моделей. Это могут быть разные архитектуры нейросетей, разные начальные условия или разные наборы гиперпараметров. Прогнозы этих моделей будут немного различаться, и разброс этих прогнозов интерпретируется как неопределённость.

4) Байесовские нейросети.

Для цифровых двойников, включающих компоненты искусственного интеллекта, байесовские нейросети представляют собой наиболее последовательный подход к учёту неопределённости [9]. В отличие от классических нейросетей, где веса являются фиксированными числами, в байесовских нейросетях веса задаются распределениями вероятностей.

При обучении вычисляется апостериорное распределение весов, а при прогнозировании – распределение выходных значений. Особую ценность

представляет возможность разделять алеаторную неопределённость и эпистемическую. На практике байесовские нейросети сложнее в обучении, но они дают гораздо более полную картину доверия к прогнозу.

Итак, рассмотренные выше методы (байесовская калибровка, вероятностное моделирование, ансамблевые подходы, байесовские нейросети) позволяют количественно оценить неопределённость прогнозов цифрового двойника. Однако полученные оценки – это ещё не готовое решение. Возникает вопрос: как представить эту информацию так, чтобы она была понятна и пригодна для практического использования? Пользователю модели нужно знать не просто «есть неопределённость», а чётко понимать: в каких условиях можно доверять прогнозу, какова величина возможного отклонения, где находятся границы применимости модели.

Для решения этой задачи предлагается концепция «цифрового паспорта доверия». Это документ (или набор метаданных, сопровождающих цифровую модель), который систематизирует всю информацию о её достоверности и делает её доступной для конечного пользователя. Его структура приведена в таблице 4.

Таблица 4

Структура «цифрового паспорта доверия»

Раздел	Содержание	Назначение
Общая информация	Назначение модели, область применения, версия, дата создания, разработчик	Идентификация модели
Область валидации	Диапазон параметров, в котором модель подтверждена экспериментально; список валидационных экспериментов	Понимание границ применимости
Количественные метрики точности	Средняя ошибка, максимальная ошибка, корень из среднеквадратичной ошибки, коэффициент детерминации	Оценка точности в области валидации
Оценки неопределенности	Расширенная неопределённость (с указанием доверительной вероятности и коэффициента охвата) для ключевых выходных параметров	Количественная характеристика доверия к прогнозам
Границы применимости	Ограничения модели (диапазоны экстраполяции, допущения, ограничения физической модели)	Предупреждение о некорректном использовании
Рекомендации по использованию	Условия, при которых модель даёт наиболее достоверные прогнозы; типовые сценарии применения	Руководство для пользователя
История изменений	Версии модели, внесённые изменения, даты валидации	Отслеживание эволюции модели

На этапе разработки модели паспорт доверия позволяет фиксировать принятые допущения и их обоснование, документировать проведённые валидационные исследования, а также планировать дополнительные эксперименты для расширения области валидации.

На этапе эксплуатации пользователь видит, например, что модель валидирована в диапазоне от 20 °C до 80 °C с неопределённостью прогноза 5%. При работе в условиях 25 °C модели можно доверять, тогда как при 100

°C использование модели сопряжено с риском получения недостоверных данных.

При передаче модели между организациями или от разработчика к эксплуатанту паспорт доверия служит официальным документом, фиксирующим свойства модели, основой для оценки рисков при использовании модели в новых условиях и средством обеспечения преемственности при развитии модели.

Паспорт доверия цифрового двойника может быть сопоставлен с требованиями к перспективным информационно-измерительным системам. Если результаты моделирования используются как основа для принятия решений, то паспорт доверия выполняет функцию, аналогичную свидетельству о поверке или сертификату о калибровке: он подтверждает, что модель прошла процедуру оценки точности и её характеристики известны.

Далее рассмотрим пути внедрения и перспективы развития.

Для того чтобы управление неопределённостью стало нормой инженерной практики, необходимо развитие по трём направлениям: нормативная поддержка, инструментальное обеспечение и подготовка кадров.

Нормативная поддержка. Требуется разработка отраслевых рекомендаций по оценке неопределенности при моделировании (на уровне РМГ или отраслевых стандартов). Целесообразно включение требований к количественной оценке неопределённости в технические задания на разработку цифровых двойников. Важна также гармонизация подходов с отечественными стандартами в области верификации, валидации и цифровых двойников.

Инструментальное обеспечение. Необходимо развитие специализированного преимущественно отечественного программного обеспечения и интеграция методов UQ в существующие платформы.

Подготовка кадров. Методы управления неопределённостью должны включаться в образовательные программы инженерных специальностей. Ключевые темы: вероятностное моделирование и статистический анализ, байесовские методы и машинное обучение, оценка неопределенности при моделировании, верификация и валидация цифровых моделей.

Переход к управлению неопределённостью имеет не только научно-методическое, но и экономическое обоснование. Сокращение объёма натурных испытаний достигается за счёт использования валидированных моделей с количественной оценкой доверия: вместо сотни образцов можно провести десяток, а остальное досчитать. Снижение рисков обеспечивается тем, что знание не только среднего значения, но и его разброса позволяет закладывать запасы обоснованно, не перестраховываясь. Оптимизация запасов прочности и ресурса становится возможной благодаря учёту реального разброса характеристик вместо консервативных допусков «на всякий случай».

Проведённый анализ позволяет сформулировать следующие выводы.

Традиционная верификация с её бинарным ответом «адекватна/не адекватна» недостаточна для современного уровня цифровизации и применения

как основной в цифровых двойниках перспективных сложных технических систем и изделий. Она не отвечает на вопрос «насколько» и не даёт инструментов для работы в условиях ограниченных данных.

Управление неопределённостью позволяет перейти к количественным оценкам доверия. Вместо точечного прогноза используются доверительные интервалы, появляется возможность однозначно разделять алеаторную и эпистемическую неопределённость и целенаправленно снижать наиболее значимые источники их возникновения в зависимости от конкретных целей и задач.

Методы UQ – байесовская калибровка, вероятностное моделирование, ансамблевые подходы, байесовские нейросети – представляют собой уже не теоретические конструкции, а реально работающие инструменты. Они требуют определённой квалификации и вычислительных ресурсов, однако выгода от их использования перекрывает затраты.

«Цифровой паспорт доверия» позволяет систематизировать информацию о достоверности цифрового двойника, включая область валидации, количественные метрики точности, оценки неопределённости и границы применимости. Он служит основой для ответственного использования модели.

Для метрологов важно, что UQ естественным образом расширяет классическую концепцию неопределённости измерений на случай, когда измерительный прибор и есть цифровая модель (цифровой двойник). Для разработчиков подход даёт инструменты, чтобы сделать модель не просто красивой, но и честной. Для руководителей – аргумент в пользу инвестиций в вероятностное моделирование, которые окупаются сокращением натурных испытаний и снижением рисков.

Перспективы развития связаны с нормативной поддержкой (разработка отраслевых стандартов), инструментальным обеспечением (интеграция методов UQ в CAE-платформы) и подготовкой кадров, владеющих методами вероятностного моделирования и оценки неопределённости. При выполнении этих условий цифровой двойник становится не просто виртуальной копией изделия, а полноценным измерительным инструментом, которому можно доверять ответственные решения.

Список литературы

1. Боровков А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // Цифровая трансформация экономики и промышленности. Сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием. – 2019. – С. 234-245.

2. Методология метрологического обеспечения на этапах жизненного цикла образцов вооружения, военной и специальной техники: учебное пособие / Б.Я. Литвинов, Н.Н. Скориантов, Р.Н. Целмс. СПб.: ГУАП, 2023. – 108 с.

3. Птушкин А.И. Байесовский подход к учёту эпистемической неопределённости параметров вероятностных моделей анализа риска принимаемых решений / А.И. Птушкин, Д.В. Решетников, Д.В. Шаповалов, А.Н. Степенко // Журнал «Современные наукоёмкие технологии».– 2020. – № 11(1). – С. 67-72.

4. Минаков Е.П. Метод оценивания характеристик цифровых моделей киберфизических систем на основе множественного регрессионного анализа результатов их применения / Е.П. Минаков, А.Е. Привалов, П.Ю. Бугайченко // Труды МАИ. – 2023. – № 131.

5. ГОСТ Р 57700.2–2017. Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 4 с.

6. Сальников А.В. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К.А. Виноградов, К.Р. Пятунин, А.С. Никулин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – № 9 (750). – С. 100-115.

7. Лабутин А. Скрытые грани «цифровых двойников»: почему виртуальные испытания отличаются от физических? [сайт]. – 2021. URL: https://globalcio.ru/discussion /15915/?ysclid=mn76os8tn7950631658 (дата обращения: 20.03.2026).

8. Горбунов А.А. Оценка достоверности цифровых двойников сложных технических систем / А.А. Горбунов, А.П. Еремеев, И.Д. Королев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2022. – № 3. – С. 42-51.

9. Малахов А. В. Сравнительный анализ математических моделей изменения метрологических характеристик информационно-измерительных систем в процессе эксплуатации / А. В. Малахов, Н. А. Минагуреев // СМиС-2025. Технологии управления качеством: материалы Международной научно-технической конференции, Москва, 21–24 мая 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 25-29. – EDN QKAZNL.

10. Малахов А. В. Метод характеризации закона распределения определяющего параметра при проектировании метрологической техники / А. В. Малахов, Р. З. Хайруллин, О. В. Фуфаева, Ю. С. Попова // Вестник метролога. – 2025. – № 3. – С. 6-11. – EDN RTMJHT.

11. Прокопчина С.В. Новый тип нейросетей: байесовские измерительные нейросети (БИН) на базе методологии регуляризирующего байесовского подхода / С.В. Прокопчина // Мягкие измерения и вычисления. – 2020. – Т. 35, № 10. – С. 17-24..

12. ГОСТ 34100.3.1-2017/ISO/IEC Guide 98-3/Suppl 1:2008. Межгосударственный стандарт. Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. – М.: Стандартинформ, 2018. – 77 с.

Малышко А.О.
студент
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, Калининград
anna.malyshk@yandex.ru
Бурдули В.В.
студент
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, Калининград
v1burdul1@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу проблемы обеспечения эксплуатационной надежности промысловых трубопроводов из полимерных армированных труб (ПАТ), рассматриваемых в качестве перспективной альтернативы традиционным стальным конструкциям в условиях агрессивных сред нефтегазодобычи. На основе аналитического обзора научно-технической литературы и сравнительного анализа выявлены и классифицированы ключевые дестабилизирующие факторы, определяющие механизм деградации композитных труб: молекулярная пермеация углеводородов и газов, температурно-временное старение полимерной матрицы, межслойное расслоение при циклических нагрузках, а также ультрафиолетовое воздействие. Установлено, что в отличие от стальных аналогов, уязвимость ПАТ обусловлена не сквозной коррозией, а нарушением адгезионных связей и скрытым накоплением усталостных повреждений. Предложен комплекс технологических, конструктивных и диагностических мер, направленных на минимизацию рисков разрушения и продление ресурса трубопроводных систем. В частности, обоснована эффективность применения плазменной активации поверхностей, интеграции ультразвукового и вихретокового неразрушающего контроля на этапе производства, а также внедрения распределенных волоконно-оптических систем мониторинга в сочетании с цифровым моделированием. Практическая значимость работы заключается в систематизации данных о механизмах разрушения ПАТ и формировании методических рекомендаций по их интеграции в нормативное проектирование и системы эксплуатационного контроля нефтегазовых объектов.

Ключевые слова: полимерные армированные трубы (ПАТ), нефтегазовые месторождения, эксплуатационная надежность, молекулярная пермеация, циклические нагрузки, неразрушающий контроль.

Malyshko A.J.
Student
Immanuel Kant Baltic Federal University
Russia, Kaliningrad
anna.malyshk@yandex.ru
Burduli V.V.
Student
Immanuel Kant Baltic Federal University
Russia, Kaliningrad
v1burdul1@gmail.com

QUALITY ASSURANCE PROBLEMS OF FIELD PIPELINE SYSTEMS MADE OF POLYMER REINFORCED PIPES

Abstract. The article is devoted to a comprehensive analysis of the problem of ensuring the operational reliability of field pipelines made of polymer reinforced pipes (PRPs), considered as a promising alternative to traditional steel structures in aggressive oil and gas production environments. Based on an analytical review of scientific and technical literature and comparative analysis, key destabilizing factors determining the mechanism of degradation of composite pipes have been identified and classified: molecular permeation of hydrocarbons and gases, temperature-time aging of the polymer matrix, interlayer stratification under cyclic loads, as well as ultraviolet exposure. It was found that, unlike steel analogues, the vulnerability of PRPs is not due to end-to-end corrosion, but to a violation of adhesive bonds and a latent accumulation of fatigue damage. A set of technological, constructive and diagnostic measures aimed at minimizing the risks of destruction and prolonging the life of pipeline systems is proposed. In particular, the effectiveness of plasma surface activation, integration of ultrasonic and eddy current non-destructive testing at the production stage, as well as the introduction of distributed fiber-optic monitoring systems in combination with digital modeling is substantiated. The practical significance of the work lies in the systematization of data on the mechanisms of PRPs destruction and the formation of methodological recommendations for their integration into the regulatory design and operational control systems of oil and gas facilities.

Keywords: polymer reinforced pipes (PRPs), oil and gas fields, operational reliability, molecular permeation, cyclic loads, non-destructive testing.

На протяжении десятилетий основой промысловой трубопроводной инфраструктуры выступали стальные трубы, обладающие высокой прочностью и предсказуемым механическим поведением. Однако агрессивные характеристики транспортируемых сред (сероводород, углекислый газ, пластовые воды с высокой минерализацией), а также сложные климатические условия регионов добычи углеводородов обуславливают интенсивные коррозионно-эрозионные процессы [1]. По данным отраслевых отчетов, более 50% фонда промысловых трубопроводов в России эксплуатируется с превышением нормативных сроков службы, что увеличивает риски аварийных ситуаций, экологических последствий и экономических потерь [2]. Несмотря на более чем 25-летнюю историю применения полимерных композитов в трубопроводном транспорте, их широкое внедрение в российские промысловые системы сталкивается с рядом технологических и нормативных ограничений [3]. Ключевой проблемой остается отсутствие унифицированных методик оценки эксплуатационного ресурса ПАТ в условиях совместного воздействия пермеации углеводородов, циклических давлений и температурных перепадов [4, 5]. Кроме того, разрозненность данных о механизмах расслоения, адгезионной совместимости слоев и эффективности современных диагностических методов затрудняет формирование единой стратегии обеспечения надежности.

Таким образом, цель исследования – систематизация факторов, определяющих эксплуатационную надежность систем промысловых трубопроводов из ПАТ и разработка научно обоснованных рекомендаций по повышению их ресурса и безопасности.

Полимерные армированные трубы представляют собой многослойную композитную конструкцию, сочетающую преимущества полимерной коррозионной стойкости и высокопрочного армирующего каркаса. Типовая структура ПАТ включает три функциональных слоя (рис. 1): внутренний герметизирующий слой – изготавливается из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) или сшитого полиэтилена (PEX, XPE). Обеспечивает гладкую гидравлическую поверхность, минимизирует гидравлические потери и защищает несущий каркас от контакта с транспортируемой средой. Силовой (армирующий) слой формируется за счет спиральной или кольцевой намотки высокопрочной стальных, синтетических или минеральных нитей или лент [1]. Он воспринимает основную нагрузку от внутреннего давления и осевых растягивающих усилий [3]. Наружный защитный слой выполняется из УФ-стабилизированного полиэтилена или полипропилена и предназначен для защиты конструкции от механических повреждений при транспортировке и монтаже, а также от атмосферных воздействий [2].

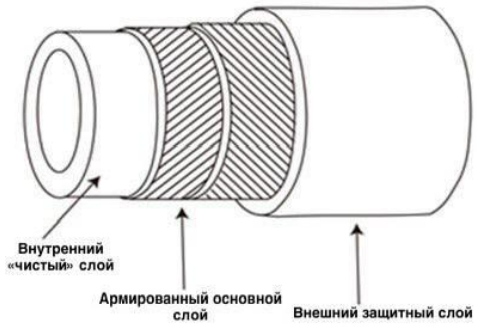


Рис. 1. Конструктивная схема полимерной армированной трубы

В зависимости от конструктивного исполнения ПАТ подразделяются на жесткие (с металлической лентой или сетчатым каркасом) и гибкие (с полимерным или комбинированным армированием, связанные и несвязанные по межслойному сцеплению) [4].

Анализ научных данных позволил выделить воздействующие факторы, определяющих механизм разрушения ПАТ в промысловых условиях.

Температурно-временная деградация полимерной матрицы обусловлена постепенное снижение внутренних напряжений в тех частях полиэтилена, где молекулы расположены хаотично. При температурах выше +60 °С наблюдается снижение модуля упругости и вязкости разрушения, что увеличивает риск ползучести и локального истончения стенок. При отрицательных температурах (ниже –20 °С) повышается хрупкость оболочки, особенно в зонах концентраторов напряжений (соединительные муфты, отводы) [2, 5].

ПАТ более чувствительны к высоким давлениям, чем стальные трубы, потому что это может привести к разрушению самого армирующего каркаса,

следовательно, критически важно производить постоянный мониторинг рабочего давления. Циклические нагрузки и гидравлические удары формируют переменные касательные напряжения на границах раздела слоев. В условиях повторяющихся пусков/остановок скважин или работы насосного оборудования возникает усталостное расслоение. Основными причинами являются: снижение межслойной адгезии и накопление микродефектов. Последствиями расслоения становятся образование межфазных полостей, заполнение их флюидом, рост локального давления и ускоренная коррозия арматуры [4, 7].

Молекулярная пермеация является доминирующим процессом долговременной деградации. Углеводороды, сероводород и углекислый газ проникают через полимерную матрицу по механизму растворения-диффузии, накапливаясь в межфазных зонах. При достижении критической концентрации проникшие газы инициируют коррозию металлической арматуры, а вода, конденсирующаяся в микрополостях, способствует гидролитическому разрушению адгезионных связей [4]. Скорость пермеации зависит от температуры и давления, что требует обязательного учета при проектировании.

Ультрафиолетовое излучение инициирует фотоокислительную деградацию наружного слоя, приводя к охрупчиванию, растрескиванию и потере защитных функций [3].

Для объективной оценки целесообразности замены стальных трубопроводов на композитные проведен сравнительный анализ их устойчивости к типовым эксплуатационным воздействиям (табл.). Данные систематизированы на основе результатов исследования.

Таблица

Сравнительная таблица факторов, воздействующих на полимерные армированные и стальные трубы

Фактор воздействия	Полимерные армированные трубы (ПАТ)	Стальные трубы
Коррозия	Полимеры устойчивы к коррозии, но металлическая арматура уязвима при нарушении герметичности внутреннего слоя или межслойном расслоении.	Подвержены электрохимической коррозии (внутренней и внешней). Требуют активной и пассивной электрохимической защиты.
Давление	Расчетное рабочее давление ограничено прочностью адгезионных связей и ресурсом арматуры [5]. При резких перепадах давления возникает риск разрыва арматуры в местах соединений.	Высокая прочность разрыва и устойчивость к гидроударам.
Химическая агрессивность среды	Полимерная матрица устойчива к кислым газам и солям, однако подвержены трудно диагностируемой пермеации.	В средах с высоким содержанием H_2C и CO_2 скорость коррозии достигает 2–5 мм/год без применения коррозионностойких сплавов или футеровки [6].
Механические нагрузки	Сниженная ударная вязкость при температурах <0°C.	Сталь имеет высокую жесткость, однако подвержена усталостному разрушению при циклических деформациях и вибрациях.
Температурный режим	Эксплуатация ограничена диапазоном –20…+60°C вследствие температурного размягчения полиэтилена.	Сохраняют механические характеристики при температурах до +300°C.

Анализ таблицы демонстрирует, что ПАТ не являются универсальной заменой стали, а представляют собой специализированное решение для сред с умеренными давлениями, высокой коррозионной активностью и ограниченными температурными режимами. Ключевым преимуществом полимерных армированных труб остается отсутствие сквозной коррозии, однако их надежность напрямую зависит от качества межслойного сцепления и герметичности соединений.

Управление качеством и расчет ресурса ПАТ остаются малоизученной областью, требующей интеграции физико-химического моделирования, накопления статистики отказов и разработки специализированного математического аппарата [3].

Механическое поведение полимерных армированных труб изучалось начиная с 70-х годов XX века [7]. Отсутствие обоснованных методов прочностного расчета и эксплуатационных характеристик ПАТ приводит к тому, что используются методы, не учитывающие температурно-временные зависимости прочности. Примером может служить расчет рабочего давления на основе разрывного давления и произвольно назначенных коэффициентов запаса прочности. При проектировании полимерной многослойной армированной трубы необходимо решить две важные задачи: подбор материалов каждого из слоев и расчет геометрии трубы и армирующего слоя [1].

В настоящее время сформировано три направления повышения эксплуатационной надежности: конструктивно-материальные решения – повышение межслойной адгезии достигается за счет плазменной активации поверхности арматуры перед намоткой и разработки сополимеров с повышенной термостабильностью [8, 9].

Технологические методы контроля качества подразумевают автоматизацию линий производства ПАТ, которая обеспечивает стабильность толщины слоев и равномерность натяжения армирующих элементов. В системе неразрушающего контроля (НК) наибольшую эффективность демонстрируют ультразвуковая дефектоскопия (выявление расслоений и полостей) и вихретоковый метод (локализация дефектов в металлической арматуре сквозь полимерную оболочку) [8].

Эксплуатационный мониторинг и цифровизация является перспективным направлением исследований. Применение распределенных волоконно-оптических систем (DTS/DAS) обеспечивает непрерывный контроль деформаций, температуры и акустических явлений по всей длине трубопровода в реальном времени (Рис. 2). Оптическое волокно интегрируется в композитную оболочку или прокладывается вдоль трассы, преобразуя механические и температурные изменения в спектральные сдвиги сигнала [9, 10]. Внедрение цифровых двойников позволяет прогнозировать остаточный ресурс с учетом накопленных циклических нагрузок и кинетики пермеации.

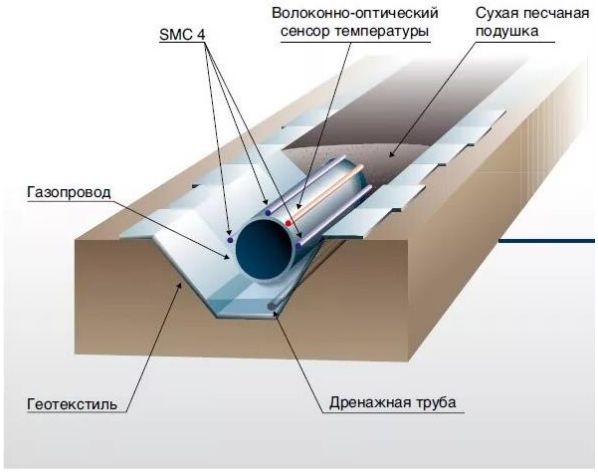


Рис. 2. Схематическое изображение технологии укладки волоконно-оптических датчиков

Несмотря на высокую эффективность, внедрение волоконно-оптических систем ограничено стоимостью оборудования и сложностью калибровки в полевых условиях. Оптимальным решением представляется гибридный подход: сочетание периодического НК на этапе приемки и стационарного оптического мониторинга на критических участках.

Проведенный аналитический обзор позволил систематизировать ключевые факторы, определяющие эксплуатационную надежность промысловых трубопроводов из полимерных армированных труб. Установлено, что основными механизмами деградации ПАТ являются молекулярная пермеация углеводородов, температурно-временное старение полимерной матрицы и межслойное расслоение при циклических нагрузках. В отличие от стальных труб, ПАТ не подвержены сквозной коррозии. Предложен комплекс технологических, конструктивных и диагностических мер, направленных на повышение ресурса и безопасности трубопроводных систем. К ним относятся: модификация полимерных матриц нанонаполнителями, плазменная активация поверхностей, интеграция ультразвукового и вихретокового контроля на этапе производства, а также применение распределенных волоконно-оптических систем мониторинга в сочетании с цифровым моделированием [10].

Перспективными направлениями дальнейших работ являются: верификация моделей пермеации на натурных участках трубопроводов, разработка единой методики усталостного расчета ПАТ с учетом температурно-влажностных воздействий, а также оценка технико-экономической эффективности внедрения гибридных систем мониторинга в условиях российских месторождений.

Список литературы

1. Аношкин А. Н., Зуйко В.Ю, Иванов С.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния и прогнозирование прочности полимерных армированных труб газового назначения //Вестник СамГУ–Естественнонаучная серия. – 2007. – №. 6. – С. 56.
2. Ковалев Д. В. Сравнительный анализ материалов труб нефтегазовой промышленности //Редакционная коллегия. – 2016. – С. 190.
3. Щербань П. С. Разработка систем показателей качества полимерных армированных труб и их соединений. Вопросы математической обработки данных // Известия Самарского научного центра РАН. 2024. №2 (118).
4. Бикмасов Р. Г. Проблемы применения полимерно-армированных труб на объектах промысловых нефтегазопроводов //Вопросы развития современной науки и техники. – 2021. – №. 1. – С. 5.
5. Сорокин А. А., Поляков В. И., Сметанина Л. А. Перспективы строительства газопроводов из новых материалов //Безопасность труда в промышленности. – 2002. – №. 10. – С. 37-41.
6. Щербань П. С. Нормативное обеспечение внедрения полимерных и полимерных армированных труб в системы промысловых трубопроводов / П. С. Щербань // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – № 9(342). – С. 57-66. – DOI 10.14489/hb.2025.09.pp.057-066. – EDN PMVTLA.
7. Хабибуллин А. В., Глазков А. С., Гулин Д. А., Дусалимов М. Э. Оценка прочности полимерных армированных трубопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2017. – №6.
8. Михеев П. В., Бухаров С. В., Лебедев А. К., Сундер Раджив. Неразрушающий контроль полимерных композиционных материалов методом вихретоковой дефектоскопии в процессе циклического нагружения // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – №11 (143).
9. Balaji D. Composite pipes and design for oil and gas industry //Polymer Composite Systems in Pipeline Repair. – Gulf Professional Publishing. – 2023. – С. 45-70.
10. Yu Z., Wen S., Wang J., Lin J., Xie C., Zeng D. Analysis of Failure Cause in Steel Wire-Reinforced Thermoplastic Composite Pipes for Sour Gas Field Water Transportation //Materials. – 2025. – Т. 18. – №. 21. – С. 48–65.

Костырин М.К.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
KryshokShitya@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ ЦИФРОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В данной статье рассматривается актуальная научно-практическая задача совершенствования метрологического обеспечения на современном промышленном предприятии через разработку и внедрение специализированной методики калибровки цифровых мультиметров. На примере деятельности предприятия ООО «Промсвет» проведен глубокий анализ условий эксплуатации парка измерительного оборудования, в ходе

которого выявлены факторы, влияющие на дрейф метрологических характеристик приборов. Автор обосновывает необходимость перехода от стандартных процедур подтверждения соответствия к комплексной калибровке, позволяющей определять действительные значения измеряемых величин и оценивать неопределенность результатов измерений.

В работе детально описан алгоритм проведения калибровочных работ, включающий требования к квалификации персонала, условиям окружающей среды и эталонной базе. Особое внимание уделено математической модели обработки данных, которая позволяет учитывать как систематические, так и случайные составляющие погрешности. Предложенная методика интегрирует современные требования к прослеживаемости измерений и соответствует международным стандартам качества. Внедрение разработанных рекомендаций в практику ООО «Промсвет» направлено на повышение достоверности измерительной информации при выходном контроле продукции, что существенно снижает риски брака и повышает общую эффективность метрологического контроля. Полученные в ходе исследования результаты могут быть масштабированы на аналогичные предприятия машиностроительного и электротехнического комплекса для оптимизации систем управления качеством.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, цифровая калибровка, мультиметр, погрешность измерений, неопределенность результатов, единство измерений, прослеживаемость, промышленная электроника, контроль качества.

Kostyrin M.K.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
KryshokShitya@yandex.ru

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF A CALIBRATION METHODOLOGY FOR DIGITAL MULTIMETERS FOR INDUSTRIAL ENTERPRISES

Abstract. This article examines the pressing scientific and practical challenge of improving metrological support at a modern industrial enterprise through the development and implementation of a specialized digital multimeter calibration methodology. Using Promsvet LLC as an example, an in-depth analysis of the operating conditions of the measuring equipment fleet was conducted, identifying factors influencing the drift of the instrument's metrological characteristics. The author substantiates the need to transition from standard conformity assessment procedures to comprehensive calibration, which enables the determination of the actual values of measured quantities and the assessment of the uncertainty of measurement results.

The paper describes in detail the calibration algorithm, including requirements for personnel qualifications, environmental conditions, and the reference base. Particular attention is paid to the mathematical data processing model, which allows for the consideration of both systematic and random error components. The proposed methodology integrates modern measurement traceability requirements and complies with international quality standards. The implementation of the developed recommendations at Promsvet LLC aims to improve the reliability of measurement data during final product inspection, significantly reducing the risk of defects and enhancing the overall effectiveness of metrological control. The results obtained during the study can be scaled up to similar enterprises in the mechanical engineering and electrical engineering industries to optimize quality management systems.

Keywords: metrological support, digital calibration, multimeter, measurement error, uncertainty of results, unity of measurements, traceability, industrial electronics, quality control.

Обеспечение точности и достоверности измерений на современном промышленном этапе развития экономики приобретает стратегическое значение. Для предприятий электротехнического профиля, таких как ООО «Промсвет», измерительная информация служит фундаментом для подтверждения качества выпускаемой продукции и обеспечения безопасности технологических процессов. В условиях автоматизации и цифровой трансформации производств цена измерительной ошибки возрастает, что накладывает особые обязательства на работу метрологических служб.

Одним из наиболее востребованных и массовых средств измерений (СИ) в лабораторной и производственной практике являются цифровые мультиметры. Обладая высокой универсальностью, они позволяют контролировать ключевые параметры электрических цепей: напряжение, ток и сопротивление. Однако специфика их эксплуатации связана с воздействием множества дестабилизирующих факторов, таких как электромагнитные помехи, температурные колебания и естественный дрейф компонентов электронной схемы. Эти факторы приводят к постепенному изменению метрологических характеристик прибора, что требует регулярного подтверждения его точности.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разработки и внедрения научно обоснованной методики калибровки цифрового мультиметра, которая была бы адаптирована к реальным условиям эксплуатации на конкретном предприятии. Это позволит не только обеспечить выполнение требований нормативных документов, но и создать базу для оценки измерительных рисков.

Объектом исследования в данной работе является система метрологического обеспечения ООО «Промсвет», а предметом – методика калибровки цифровых мультиметров, используемых при выходном контроле продукции. Цель работы заключается в оптимизации процедур калибровки для повышения достоверности измерительной информации и минимизации вероятности пропуска дефектных изделий. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи по анализу текущего состояния парка СИ, обоснованию выбора эталонной базы и формализации процедур обработки результатов калибровки.

В основу разработки методики калибровки цифрового мультиметра для ООО «Промсвет» положен комплексный подход, сочетающий в себе экспериментальные измерения и методы глубокой аналитики. Исследование базируется на анализе стохастических процессов возникновения погрешностей и систематизации факторов, влияющих на метрологическую стабильность приборов.

На этапе проектирования методики был применен метод сравнительного анализа существующих отечественных и международных стандартов (ГОСТ Р 8.879, ISO/IEC 17025). Аналитическая работа включала в себя:

Ретроспективный анализ: изучение журналов поверки и калибровки СИ на предприятии за последние три года для выявления наиболее «дрейфующих» диапазонов измерений.

Метод декомпозиции: разбиение сложного процесса измерения на составляющие компоненты для выявления источников неопределенности (инструментальная, методическая, личностная).

Логико-математическое моделирование: разработка алгоритма обработки данных, который позволяет не только фиксировать текущую погрешность, но и анализировать тренд изменения точности прибора.

Экспериментальная часть методики реализуется методом прямых измерений с использованием многофункционального калибратора. Для минимизации внешних воздействий аналитически обоснованы и установлены жесткие рамки условий окружающей среды: температура (23 ± 5) °C и влажность до 80%. Выбор точек калибровки (не менее пяти на каждом диапазоне) обоснован анализом нелинейности характеристик аналого-цифровых преобразователей, применяемых в современных мультиметрах.

Процедура сбора и аналитической обработки данных

Алгоритм калибровки включает в себя:

1. Подготовительный этап: идентификация СИ и проверка его готовности к работе.
2. Измерительный цикл: многократные наблюдения (не менее 10 в каждой точке) для последующей статистической обработки по типу А.
3. Аналитическая интерпретация результатов: расчет абсолютной и относительной погрешностей.

Ключевым аналитическим элементом методики является внедрение оценки расширенной неопределенности. В отличие от упрощенного расчета погрешности, данный метод требует анализа коэффициентов чувствительности для каждого фактора влияния. Это позволяет построить бюджет неопределенности, который служит инструментом предиктивного анализа: если текущая неопределенность приближается к предельно допустимой, принимается решение о сокращении межкалибровочного интервала. Таким образом, методология превращает калибровку из пассивной процедуры фиксации состояния в активный инструмент управления качеством измерительных процессов.

В ходе апробации разработанной методики были проведены калибровочные работы для цифрового мультиметра в диапазонах измерения постоянного напряжения (DCV) и сопротивления (R). Основная цель этапа заключалась в расчёте фактических погрешностей, оценке расширенной неопределенности и подтверждении соответствия прибора заявленным метрологическим характеристикам.

1. Обработка результатов измерений и расчет погрешностей

Для каждой контрольной точки было выполнено 10 независимых измерений. Расчет абсолютной погрешности Δ проводился по формуле:

$$\Delta = \bar{X} - S,$$

где $\bar{X}$ – среднее арифметическое показаний мультиметра, S – значение, воспроизводимое эталонным калибратором.

Пример полученных данных для диапазона 20 В (DC):

- Эталонное значение: 10,000 В.
- Среднее значение прибора: 10,004 В.
- Абсолютная погрешность: +0,004 В.
- Относительная погрешность: 0,04%.

2. Оценка неопределенности измерений согласно предложенной методике, была проведена оценка неопределенности по двум типам:

- Тип А: оценивался как среднеквадратическое отклонение результатов серии измерений. Для исследуемого прибора составляющая составила не более 0,0012 В.
- Тип В: учитывал инструментальную погрешность эталона (из сертификата калибровки), разрешение дисплея мультиметра и температурный дрейф.

Суммарная стандартная неопределенность (u_c) рассчитывалась методом корня из суммы квадратов всех составляющих. При коэффициенте охвата k=2 (доверительная вероятность 95%) расширенная неопределенность (U) для выбранных точек не превысила допустимых пределов, установленных производителем для данного класса точности.

3. Аналитическая интерпретация и выводы

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- Метрологическая пригодность: Фактические значения погрешностей цифрового мультиметра во всех проверенных точках находятся в пределах допуска. Прибор признан пригодным для использования в производственных подразделениях ООО «Промсвет».
- Стабильность характеристик: Сравнение с данными предыдущих проверок (ретроспективный анализ) показал отсутствие значимого дрейфа характеристик, что подтверждает корректность выбранного межповерочного интервала.
- Эффективность методики: Внедрение алгоритма расчета бюджета неопределенности позволило более точно идентифицировать источники случайных погрешностей, что в долгосрочной перспективе снижает риск пропуска бракованных изделий на этапе контроля качества продукции ООО «Промсвет».

Таким образом, разработанная методика обеспечивает прослеживаемость измерений к государственным эталонам и может быть рекомендована к официальному внедрению в метрологическую практику предприятия.

Список литературы

1. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
3. ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению.
4. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
5. ГОСТ Р 8.563-2009. ГСИ. Методики (методы) измерений.
6. ГОСТ 8.027-2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы.
7. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
8. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология: Учебное пособие для вузов. – М.: Логос, 2021.
9. Кузнецов В. А., Ялунина Г. В. Основы метрологии. Учебное пособие. – М.: Издательство стандартов, 2020.
10. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2021.
11. Данилов А. А. Метрологическое обеспечение измерительных систем. – Пенза: ПГУ, 2019.
12. Лифиц И. М. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для прикладного бакалавриата. – М.: Издательство Юрайт, 2022.

Юдочкин П.Ю.
студент
Тульский государственный университет
Россия, Тула
p.yudochkin@yandex.ru
Ушаков М.В.
д.т.н., профессор кафедры «Инструментальные и метрологические системы»
Тульский государственный университет
Россия, Тула
tulaumv@yandex.ru

РАСЧЕТ И УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВОДОРОДНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ ЕЕ МИНИМИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ

Аннотация. Калибровка с определением неопределённости нужна для повышения точности измерений. Неопределённость – показатель, который приводится вместе с результатом измерений и характеризует разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Основные цели калибровки с расчётом неопределённости, рассмотренные в данной статье:

1. Определение действительных значений метрологических характеристик средств измерений. Калибровка показывает, как номинальное значение меры или показания инструмента соотносится с принятым действительным значением измеряемой величины.

2. Учёт факторов, влияющих на результат. Неопределённость включает в себя много составляющих, некоторые из них могут быть оценены из статистического распределения результатов ряда измерений, а другие получены априорно.

3. Обеспечение прослеживаемости результатов. Калибровочные лаборатории заинтересованы в максимально широком признании результатов, которое обеспечивается посредством предоставления данных о значениях неопределённости.

Использование специального прибора – pH-метра – позволяет измерять pH в более широком диапазоне и более точно, чем с помощью индикаторов. Ионометрический метод определения pH основывается на измерении милливольтметром-ионометром ЭДС гальванической цепи, включающей специальный стеклянный электрод, потенциал которого зависит от концентрации ионов H+ в окружающем растворе.

Неопределённость может складываться из погрешности прибора, электродов, стандарт-титров, иногда – из погрешности пробоподготовки. Также возникают дополнительные погрешности, например, от влияния температуры.

Ключевые слова: pH-метр, метрологические характеристики, неопределённость, факторы, результат измерения, калибровка, электродная система, кислотность.

Yudochkin P.Yu.
Student
Tula State University
Russia, Tula
p.yudochkin@yandex.ru
Ushakov M.V.
Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Instrumental and Metrological Systems
Tula State University
Russia, Tula
tulaumv@yandex.ru

CALCULATION AND MANAGEMENT OF HYDROGEN MEASUREMENT UNCERTAINTY TO MINIMIZE IT IN THE FACE OF NEW CHALLENGES

Abstract. Calibration with uncertainty determination is necessary to improve measurement accuracy. Uncertainty is a measure provided with a measurement result that characterizes the spread of values that could reasonably be attributed to the measurand.

The main objectives of calibration with uncertainty calculation, discussed in this article, are:

1. Determining the true values of the metrological characteristics of measuring instruments. Calibration demonstrates how the nominal value of a measure or instrument reading relates to the accepted true value of the measurand.

2. Accounting for factors influencing the result. Uncertainty includes many components, some of which can be estimated from the statistical distribution of a series of measurement results, while others are determined a priori.

3. Ensuring traceability of results. Calibration laboratories are interested in the broadest possible acceptance of their results, which is ensured by providing uncertainty data.

Using a specialized instrument–a pH meter–allows pH measurements over a wider range and more accurately than with indicators. The ionometric method for determining pH is based on measuring the emf of a galvanic circuit using a millivoltmeter-ionometer. This circuit includes a special glass electrode whose potential depends on the concentration of H+ ions in the surrounding solution.

Uncertainty can arise from the error of the instrument, electrodes, standard titers, and sometimes from sample preparation errors. Additional errors also arise, such as those due to temperature.

Keywords: pH meter, metrological characteristics, uncertainty, factors, measurement result, calibration, electrode system, acidity.

pH-метр – прибор для измерения водородного показателя (показателя pH), характеризующего активность ионов водорода в растворах, пищевой продукции и сырье, объектах окружающей среды и производственных системах непрерывного контроля технологических процессов (в том числе в агрессивных средах).

Действие pH-метра основано на измерении величины ЭДС электродной системы, которая, в своё время, пропорциональна активности ионов водорода в растворе – pH (водородному показателю). Измерительная схема представляет собой вольтметр, проградуированный непосредственно в единицах pH для конкретной электродной системы.

Прибор может использоваться во многих производствах, где необходим контроль среды, универсальным показателем состояния которой и соответствия её требуемым – является pH: при высокотехнологичном производстве всех видов горючего, в фармакологической, косметической, лакокрасочной, химической, пищевой промышленности. pH-метры имеют широкое применение в научно-исследовательской практике химиков, микробиологов и почвоведов, агрохимиков, в лабораториях стационарных и передвижных, в том числе полевых, а также клинико-диагностических (для контроля физиологических норм и диагностики), судебно-медицинских. Последнее время pH-метры также широко используются для контроля качества воды в бытовых условиях, в земледелии (особенно в гидропонике). Вследствие этого необходимо измерять уровень кислотности с требуемой точностью.

При выборе электрода для pH метра важно учитывать следующие факторы:

1. Определить, с какой средой будет работать электрод. Для агрессивных химических растворов и высоких температур использовать тот, который устойчив к внешним воздействиям.
2. Учитывать, где будет использоваться электрод – в лаборатории, на производстве или в полевых условиях. Для частой транспортировки использовать комбинированные электроды с прочным корпусом.
3. Если необходимы высокоточные данные, выбрать более чувствительные электроды, которые обеспечивают минимальную погрешность.

4. Оценить срок службы электрода и его стоимость. Выбор правильного электрода для измерения pH зависит от множества факторов, включая тип среды, условия эксплуатации и требования к точности. Знание характеристик, таких как тип используемого электрода, а также правильный уход за ним помогут обеспечить точные и стабильные измерения.

Точное наведение калибровочного раствора (буферного раствора) на pH при калибровке pH-метра необходимо для обеспечения точности измерений. Буферный раствор – жидкость с точно установленным значением pH, которое не меняется при добавлении небольшого количества кислоты или щелочи, и служит эталоном при настройке pH-метра.

Чтобы оценить погрешность результатов измерений измеряют неопределённость уровня pH. Это необходимо, так как все результаты измерений содержат погрешность, и величина погрешности для каждого отдельного результата не может быть достоверно установлена.

Подробное руководство по выражению неопределенности измерения содержит ГОСТ 34100.3-2017.

Особенности расчёта неопределённости, установленные в стандарте:

1. Учёт составляющих неопределённости – при оценивании составляющей неопределённости, связанной с вносимой поправкой, учитывают неопределённости, вносимые эталонами и стандартными образцами.

2. Использование суммарной стандартной неопределённости – она является оценкой стандартного отклонения результата измерения, равной положительному квадратному корню из суммарной дисперсии, то есть суммы дисперсий и ковариаций всех составляющих неопределённости.

3. Использование расширенной неопределённости – её получают умножением суммарной стандартной неопределённости на коэффициент охвата, чтобы построить интервал, охватывающий результат измерения, в пределах которого, как можно ожидать, будет находиться большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны измеряемой величине. Далее приведено оборудование и методология для расчёта неопределённости pH.

Средства калибровки, используемые для расчёта неопределённости

1. 91680-24 Стандарт-титр pH 6/630-452-08/25-4 2025 Эталон 1 разряда ГПС для средств измерений показателя pH активности ионов водорода в водных растворах. Приказ № 324 от 09.02.2022 г.;

2. 91680-24 Стандарт-титр pH 6/630-455-08/25-3 2025 Эталон 1 разряда ГПС для средств измерений показателя pH активности ионов водорода в водных растворах. Приказ № 324 от 09.02.2022 г.;

3. - 91680-24 Стандарт-титр pH 6/630-458-08/25-3 2025 Эталон 1 разряда ГПС для средств измерений показателя pH активности ионов водорода в водных растворах. Приказ № 324 от 09.02.2022 г.;

4. 40239-08 Компаратор-калибратор универсальный КМ300 040 2010 Эталон 1 разряда Приказ № 2091 от 1 октября 2018 г.;

5. 61806-15 Термометр лабораторный электронный ЛТ-300 № 809204;

6. 25777-03 Термостат жидкостный Термотест-100 №306001;
7. 46434-11 Термогигрометр ИВА-6Н-Д №3Е34.

Выявление и анализ факторов, влияющих на результат измерения, составление модельного уравнения

Отклонение от концентрации буферного раствора определяется по формуле:

$$\Delta = (\mathrm{C}_u + \delta_\text{д}) - (\mathrm{C}_\text{обр} + \delta_\text{р}), \quad (1)$$

где C_u – показания калибруемого прибора;

$C_\text{обр}$ – значение pH буферного раствора;

$\delta_\text{р}$ – поправка на погрешность буферного раствора;

$\delta_д$ – поправка на дискретность отсчета калибруемого СИ.

Оценивание входных величин и их неопределенностей

Величина C_uнепосредственно определяется при калибровке, поэтому ее стандартную неопределенность $u(\mathrm{C}_u)$ определяем путем статистической обработки полученных при измерении данных.

Оценку значения C_uпроизводим путем определения среднего арифметического результатов измерений:

$$\overline{\mathrm{C}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i}{n}, \text{pH}, \quad (2)$$

где C_i– i-ое значение концентрации, измеренное калибруемым прибором,pH;

n – количество измерений.

Оценкой величины $\mathrm{C}_\text{обр}$ является значение $\hat{\mathrm{C}}_\text{обр}$ концентрации буферного раствора.

$\delta_\text{р}, \delta_\text{д}$ −являются центрированными случайными величинами, поэтому их оцененные значения равны нулю.

Стандартную неопределенность $u(\mathrm{C}_u)$ находим, как стандартное отклонение результатов измерений

$$u(\mathrm{C}_u) = \sqrt{\frac{\sum(\mathrm{C}_i - \overline{\mathrm{C}})^2}{n(n-1)}}, \text{pH} \quad (3)$$

Стандартные неопределенности по типу В вычисляются из известных входных величин:

$$u(\delta_\text{р}) = \frac{\Delta(\mathrm{C}_\text{обр})}{\sqrt{3}}, \text{pH} \quad (4)$$

$$u(\delta_\text{д}) = \frac{d}{2\sqrt{3}}, \text{pH} \quad (5)$$

где d – дискретность отсчета калибруемого СИ, pH;

$\Delta(\mathrm{C}_\text{обр})$ – значение допустимого отклонения буферного раствора от номинального значения, pH, согласно ГОСТ 8.135-2004.

Оценка числового значения измеряемой величины

Оценку измеряемой величины получаем, подставив оценки значений входных величин в формулу (1):

$$\hat{\Delta} = \overline{\mathrm{C}} - \hat{\mathrm{C}}_{\text{обр}}, \text{pH} \quad (6)$$

Вычисление вкладов неопределенностей входных величин в неопределенность измеряемой величины.

Определение коэффициентов чувствительности.

Коэффициенты чувствительности находят как частные производные выходной величины по каждой из входных величин:

$$\mathrm{c}(\mathrm{C}_u) = \mathrm{c}(\delta_{\text{д}}) = 1 \quad (7)$$

$$\mathrm{c}(\delta_{\text{р}}) = -1. \quad (8)$$

Поэтому вклады неопределенности входных величин равны стандартным неопределенностям этих величин с учетом знака.

Вычисляется суммарная стандартная неопределенность:

$$u_{\text{с}}(\Delta) = \sqrt{u^2(\mathrm{C}_u) + u^2(\delta_{\text{р}}) + u^2(\delta_{\text{д}})}, \text{pH} \quad (9)$$

Вычисляется расширенная неопределенность.

Расширенная неопределенность результата измерений рассчитывается путем умножения стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата k=2 при доверительной вероятности P = 0,95, при допущении нормального распределения.

$$U = k \cdot u_{\text{с}}(\Delta), \text{pH} \quad (10)$$

Записывают результат измерений:

$$\Delta = (\hat{\Delta} \pm U), \text{pH} \quad (11)$$

Неопределенность записывается не более чем с двумя значащими цифрами. Числовое значение результата измерений должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и округленная неопределенность. В промежуточных результатах оставляют 3-4 значащих цифры для точности.

Обработка результатов определения действительных значений метрологических характеристик измерительного преобразователя иономера при измерении ЭДС электродной системы.

Выявление и анализ факторов, влияющих на результат измерения, составление модельного уравнения.

Отклонение от заданного значения ЭДС определяется по формуле:

$$\Delta\mathrm{E} = (\mathrm{E}_u + \delta_{\text{де}}) - (\mathrm{E}_{\text{обр}} + \delta_{\text{ер}}), \quad (12)$$

где E_u – показания калибруемого прибора;

$E_{обр}$ – значение мВ, заданное на калибраторе напряжений;

$\delta_{ер}$ – поправка на погрешность калибратора напряжений;

$\delta_{де}$ – поправка на дискретность отсчета калибруемого СИ.

Оценивание входных величин и их неопределенностей

Величина E_uнепосредственно определяется при калибровке, поэтому ее стандартную неопределенность $u(E_u)$ определяем путем статистической обработки полученных при измерении данных.

Оценку значения E_u производим путем определения среднего арифметического результатов измерений:

$$\overline{E} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{n}, \text{мВ} \quad (13)$$

где E_i– i-ое значение ЭДС, измеренное калибруемым прибором, мВ;

n – количество измерений.

Оценкой величины $E_{обр}$ является значение $\widehat{E}_{обр}$, заданное на калибраторе напряжений.

$\delta_{ер}, \delta_{де}$являются центрированными случайными величинами, поэтому их оцененные значения равны нулю.

Стандартную неопределенность $u(E_u)$ находим, как стандартное отклонение результатов измерений

$$u(E_u) = \sqrt{\frac{\sum(E_i - \overline{E})^2}{n(n-1)}}, \text{мВ} \quad (14)$$

Стандартные неопределенности по типу В вычисляются из известных входных величин:

$$u(\delta_{ер}) = \frac{\Delta(E_{обр})}{\sqrt{3}}, \text{мВ} \quad (15)$$

$$u(\delta_{ер}) = \frac{U(E_{обр})}{k_c}, \text{мВ} \quad (16)$$

$$u(\delta_{де}) = \frac{d_e}{2\sqrt{3}}, \text{мВ} \quad (17)$$

где d_e – дискретность отсчета калибруемого СИ, мВ;

$U(E_{обр})$, k_c – соответственно расширенная неопределенность, мВ, и коэффициент охвата образцового СИ, указанные в сертификате о калибровке;

$\Delta(E_{обр})$ – погрешность образцового СИ, мВ.

Формула (15) применяется, если на образцовое СИ выдано свидетельства о поверке, (16) – сертификат о калибровке с расчетом расширенной неопределенности в точках, совпадающих с значениями контрольных точек.

Оценка числового значения измеряемой величины

Оценку измеряемой величины получаем, подставив оценки значений входных величин в формулу (12):

$$\widehat{\Delta \mathrm{E}} = \overline{\mathrm{E}} - \widehat{\mathrm{E}}_{\text{обр}}, \text{мВ}. \quad (18)$$

Вычисление вкладов неопределенностей входных величин в неопределенность измеряемой величины.

Определение коэффициентов чувствительности.

Коэффициенты чувствительности находят как частные производные выходной величины по каждой из входных величин:

$$\mathrm{c}(\mathrm{E}_u) = \mathrm{c}\left(\delta_{\text{де}}\right) = 1, \quad (19)$$

$$\mathrm{c}\left(\delta_{\text{ер}}\right) = -1. \quad (20)$$

Поэтому вклады неопределенности входных величин равны стандартным неопределенностям этих величин с учетом знака.

Вычисляется суммарная стандартная неопределенность:

$$u_{\mathrm{c}}(\Delta \mathrm{E}) = \sqrt{u^2(\mathrm{E}_u) + u^2\left(\delta_{\text{ер}}\right) + u^2\left(\delta_{\text{де}}\right)}, \text{мВ}. \quad (21)$$

Вычисляется расширенная неопределенность.

Расширенная неопределенность результата измерений рассчитывается путем умножения стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата k=2 при доверительной вероятности P = 0,95, при допущении нормального распределения.

$$U = k \cdot u_{\mathrm{c}}(\Delta \mathrm{E}), \text{мВ} \quad (22)$$

Записывают результат измерений:

$$\Delta \mathrm{E} = \left(\widehat{\Delta \mathrm{E}} \pm U\right), \text{мВ} \quad (23)$$

Расчет неопределенности производится для каждой точки калибровки.

Концентрация буферного раствора: 1,646 pH, $\mathrm{C}_{\text{и ср.}}$ = 1,660 pH

Таблица 1

Бюджет неопределенности

Входная величина	Оценка входной величины, pH	Стандартная неопределенность, pH	Тип оценивания/ закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности pH
$\mathrm{C}_{\text{и}}$	1,660	0,0037	А/нормальный	1	0,0037
$\mathrm{C}_{\text{обр}}$	1,646	-	-	-	-
$\delta_р$	-	0,0023	В/равномерный	-1	-0,0023
$\delta_д$	-	0,00029	В/равномерный	1	0,00029
Выходная величина	Оценка выходной величины, pH	Стандартная суммарная неопределенность, pH	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, pH
Δ	0,0140	0,0044	P = 0,95	2	0,0088

Результат измерений в точке калибровки: 1,646 pH Δ = (0,0140 ± 0,0088) pH

Концентрация буферного раствора: 6,865 pH, $C_{и\ ср.}$ = 6,874 pH

Таблица 2

Бюджет неопределенности

Входная величина	Оценка входной величины, pH	Стандартная неопределенность, pH	Тип оценивания/ закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности pH
$C_и$	6,874	0,0056	А/нормальный	1	0,0056
$C_{обр}$	6,865	-	-	-	-
$\delta_р$	-	0,0023	В/равномерный	-1	-0,0023
$\delta_д$	-	0,00029	В/равномерный	1	0,00029
Выходная величина	Оценка выходной величины, pH	Стандартная суммарная неопределенность, pH	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, pH
Δ	0,0090	0,0061	P = 0,95	2	0,0122

Результат измерений в точке калибровки: 6,865 pH Δ = (0,0090 ± 0,0122) pH

Концентрация буферного раствора: 10,012 pH, $C_{и\ ср.}$ = 10,020 pH

Таблица 3

Бюджет неопределенности

Входная величина	Оценка входной величины, pH	Стандартная неопределенность, pH	Тип оценивания/ закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности pH
$C_и$	10,020	0,0039	А/нормальный	1	0,0039
$C_{обр}$	10,012	-	-	-	-
$\delta_р$	-	0,0023	В/равномерный	-1	-0,0023
$\delta_д$	-	0,00029	В/равномерный	1	0,00029
Выходная величина	Оценка выходной величины, pH	Стандартная суммарная неопределенность, pH	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, pH
Δ	0,0080	0,0045	P = 0,95	2	0,0090

Результат измерений в точке калибровки: 10,012 pH Δ = (0,0080 ± 0,0090) pH

Определение действительных значений метрологических характеристик измерительного преобразователя иономера при измерении ЭДС электродной системы

Точка калибровки: -1500 мВ, $E_{и\ ср.}$ = -1500,06 мВ

Таблица 4

Бюджет неопределенности

Входная величина	Оценка входной величины, мВ	Стандартная неопределенность, мВ	Тип оценивания/ закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности, мВ
$E_и$	-1500,06	0,093	А/нормальный	1	0,093
$E_{обр}$	-1500	-	-	-	-
$\delta_{ер}$	-	0,00031	В/равномерный	-1	-0,00031
$\delta_{де}$	-	0,029	В/равномерный	1	0,029
Выходная величина	Оценка выходной величины, мВ	Стандартная суммарная неопределенность, мВ	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, мВ
Δ	-0,06	0,097	P = 0,95	2	0,194

Результат измерений в точке калибровки: -1500 мВ $\Delta = (-0{,}06 \pm 0{,}19)$ мВ
Точка калибровки: 0 мВ, $E_{и\ ср.} = 0{,}14$ мВ

Таблица 5

Бюджет неопределенности

Входная величина	Оценка входной величины, мВ	Стандартная неопределенность, мВ	Тип оценивания/ закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности, мВ
$E_и$	0,14	0,024	А/нормальный	1	0,024
$E_{обр}$	0	-	-	-	-
$\delta_{ер}$	-	0,00031	В/равномерный	-1	-0,00031
$\delta_{де}$	-	0,029	В/равномерный	1	0,029
Выходная величина	Оценка выходной величины, мВ	Стандартная суммарная неопределенность, мВ	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, мВ
Δ	0,14	0,038	P = 0,95	2	0,076

Результат измерений в точке калибровки: 0 мВ $\Delta = (0{,}14 \pm 0{,}08)$ мВ
Точка калибровки: 1500 мВ, $E_{и\ ср.} = 1000$ мВ

Таблица 6

Бюджет неопределенности

Входная величина	Оценка входной величины, мВ	Стандартная неопределенность, мВ	Тип оценивания/ закон распределения	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности, мВ
$E_и$	1500	0,055	А/нормальный	1	0,055
$E_{обр}$	1500	-	-	-	-
$\delta_{ер}$	-	0,000064	В/равномерный	-1	-0,000064
$\delta_{де}$	-	0,029	В/равномерный	1	0,029
Выходная величина	Оценка выходной величины, мВ	Стандартная суммарная неопределенность, мВ	Уровень доверия	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, мВ
Δ	0	0,062	P = 0,95	2	0,124

Результат измерений в точке калибровки: 1000 мВ Δ = (0 ± 0,12) мВ. Итак, измерение неопределённости уровня pH помогает оценить погрешность результатов измерений и качество результата, а также учесть неопределённость при сопоставлении результата с предельным значением (нормативом). Кроме того, есть информация, что суммарную стандартную неопределённость измерений pH можно уменьшить, например, с помощью современного прецизионного оборудования.

В результате включения такого оборудования в состав государственного первичного эталона pH суммарную стандартную неопределённость измерений удалось сократить на 40%.

Список литературы

1. Р 50.2.035-2004 – «Государственная система обеспечения единства измерений. Электроды стеклянные, в том числе комбинированные, для определения активности ионов водорода (pH) в водных растворах. Методика поверки».

2. «Справочник по измерению pH: теория и практика лабораторных измерений» –от компании Mettler Toledo.

3. «Потенциометрический метод анализа» – Т. А. Ермакова, В. В. Акатьев, В. Т. Фомичев, Е. С. Дрючков. Учебно-методическое пособие для студентов направлений подготовки «Наноинженерия», «Нанотехнологии и микросистемная техника», специальности «Судебная экспертиза», издательство ВолГУ, 2020.

Чиликина Н.М.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
tash18.12@yandex.ru
Вячеславова О.Ф.
д.т.н., профессор кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vyache-smis@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ПРОДУКЦИИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ: РЕГУЛЯТОРНЫЙ АСПЕКТ

Аннотация. В данной публикации анализируется трансформация нормативных предписаний, касающихся подтверждения пригодности аналитических процедур в фармацевтической индустрии. Подчеркивается, что ранее преобладал подход, заключавшийся в однократной валидации, в основном для хроматографических методик. Однако сейчас наблюдается переход к парадигме, основанной на концепции жизненного цикла аналитической методики, закреплённой в руководствах ICH Q2(R2) и фармакопейных главах USP <1220> и <1225>. Показано, что ключевым элементом нового подхода становится коли-

чественная оценка неопределённости измерений (MU), которая выступает в роли сквозного инструмента управления качеством – от определения аналитического целевого профиля (ATP) до рутинного мониторинга и управления изменениями. На основе анализа схемы жизненного цикла обоснована необходимость документирования MU на каждом этапе для обеспечения достоверности, прослеживаемости результатов и принятия обоснованных решений о соответствии партий. Выявлены основные проблемы внедрения требований: методологический разрыв (отсутствие унифицированных внутрилабораторных методик расчёта MU) и кадровые ограничения (недостаточная компетенция аналитиков в области статистики). Сделан вывод, что неопределённость измерений становится обязательным условием соблюдения GMP и основой для дальнейшей автоматизации лабораторных процессов.

Ключевые слова: жизненный цикл аналитической методики, неопределённость измерений, валидация, ICH Q2(R2), USP <1220>, аналитический целевой профиль, управление качеством.

Chilikina N.M.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
tash18.12@yandex.ru
Vyacheslavova O.F.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vyache-smis@mail.ru

MODERN CHALLENGES AND REQUIREMENTS TO THE QUALITY OF PHARMACEUTICAL INDUSTRY PRODUCTS: REGULATORY ASPECT

Abstract. This publication analyzes the transformation of regulatory requirements related to the confirmation of the suitability of analytical procedures in the pharmaceutical industry. It is emphasized that previously the prevailing approach consisted of a single validation, mainly for chromatographic techniques. However, there is now a shift towards a paradigm based on the concept of the analytical methodology lifecycle, as set out in the ICH Q2(R2) guidelines and pharmacopoeial chapters USP <1220> and <1225>. It is shown that the key element of the new approach is the quantification of measurement uncertainty (MU), which acts as an end-to-end quality management tool, from defining an analytical target profile (ATP) to routine monitoring and change management. Based on the analysis of the life cycle scheme, the necessity of documenting the MU at each stage is justified to ensure the reliability, traceability of results and making informed decisions about the conformity of batches. The main problems of implementing the requirements have been identified: a methodological gap (lack of unified in-laboratory methods for calculating MU) and personnel constraints (insufficient competence of analysts in the field of statistics). It is concluded that measurement uncertainty becomes a prerequisite for compliance with GMP and the basis for further automation of laboratory processes.

Keywords: life cycle of analytical methodology, measurement uncertainty, validation, ICH Q2(R2), USP<1220>, analytical target profile, quality management.

В более ранних руководствах Европейской (EP) и Американской (USP) Фармакопей валидация аналитических методов рассматривалась как отдельная процедура, ориентированная в основном на хроматографические методы и проводимая один раз. Погрешности измерений, нелинейным моделям калибровки, оценке рисков, а также современным методам (масс-спектрометрии, спектроскопии в ближней инфракрасной области) не уделялось должного внимания. Современные же руководства вводят понятие «жизненный цикл аналитической методики» – управление аналитической методикой на всех этапах её существования. Подход, основанный на понятии жизненного цикла метода, направлен на понимание и контроль аналитической вариативности и позволяет определить характеристики эффективности метода. Это изменение закреплено в новых руководствах ICH Q2(R2) и фармакопейных статьях USP <1220>, <1225>, и оно напрямую актуализирует проблему достоверности и воспроизводимости результатов измерений. В условиях ужесточения требований к прослеживаемости данных концепция неопределённости измерений (measurement uncertainty, MU) превращается в практический инструмент управления качеством.

Для достижения цели исследования (анализа эволюции регуляторных требований к валидации аналитических методик и обоснования роли неопределённости измерений (MU) в концепции жизненного цикла) применена совокупность теоретических и аналитических методов. Работа выполнена в формате аналитического обзора нормативных документов и научно-методической литературы. Исследование носит качественный характер и направлено на выявление логики формирования требований к неопределённости измерений на различных этапах жизненного цикла аналитической методики. Объектом исследования выступают современные регуляторные требования к валидации аналитических методик в фармацевтической отрасли. Предметом исследования – концепция неопределённости измерений как сквозной элемент управления качеством на всех этапах жизненного цикла методики. В анализ включены нормативные документы международного уровня и фундаментальные метрологические руководства.

В работе применены следующие методы:

Контент-анализ нормативных документов, нацеленный на выявление и систематизацию требований, связанных с неопределённостью измерений, на каждом этапе жизненного цикла методики (разработка, валидация, рутинное использование, управление изменениями);

Сравнительно-правовой метод – сопоставление традиционного подхода к валидации (разовая процедура) и современного подхода (жизненный цикл);

Логико-структурный анализ – описание схемы жизненного цикла аналитической методики (рисунок) и выявления «точек входа» требований к документированию неопределённости измерений на каждом этапе: от стратегии контроля до рутинного мониторинга и непрерывного улучшения;

Метод систематизации – классификация выявленных проблем внедрения требований к MU на методологические, технологические и кадровые.



Рис. Жизненный цикл аналитической методики

Ключевые регуляторные изменения 2022–2026 годов включают в себя:

1. USP <1220>, <1225> [1, 2] – общие главы Фармакопеи США (United States Pharmacopeia, USP), устанавливающие стандарты для фармацевтической отрасли в отношении аналитических методик через закрепление понятия «жизненный цикл аналитической процедуры. Предлагается ввести термин «сообщаемый результат» для обозначения конечного выходного параметра, критически важного для оценки соответствия партии. Валидация, в данном контексте, определяется как последующий за разработкой, второй этап аналитического жизненного цикла метода.

В USP <1220> (Жизненный цикл аналитической методики (Analytical Procedure Life Cycle)) описывает современный подход к аналитическим методам, рассматривая их не как одноразовую процедуру, а как процесс с жизненным циклом.

В USP <1225> (Валидация фармакопейных методик (Validation of Compendial Methods)) описывает, как доказывается валидность метода перед использованием (документальное подтверждение параметров). В документе подробно изложены требования, которым должна соответствовать валидация различных аналитических методик. Это касается таких важных тестов, как идентификация веществ, количественное определение примесей, а также испытания на предельное содержание. Кроме того, документ чётко определяет основные критерии валидации, такие как правильность (accuracy), прецизионность (precision), специфичность (specificity), предел обнаружения (LOD) и предел количественного определения (LOQ). Особое внимание следует уделить обеим главам, поскольку их соблюдение является фундаментальным условием для поддержания надлежащей производственной практики (GMP) при проведении анализов лекарственных средств. Обе

главы имеют критическое значение для обеспечения соответствия анализов лекарственных средств стандартам GMP.

ICH Q2(R2), Q14 [3, 4] – руководство аналитических методик, валидация аналитических методик. Введено требование использования доверительных интервалов для оценки правильности и прецизионности, которые должны быть совместимы с критериями приемлемости.

Руководство ICH Q2(R2) содержит рекомендации по процессу получения, представления и поддержания данных, которые подтверждают пригодность аналитической методики для ее использования по назначению. В нем также изложены принципы выбора и оценки валидационных параметров методики.

Далее представлено подробное описание приведённой на рисунке схемы, которая базируется на концепциях ICH Q8–Q11, ICH Q14 и USP<1220>. Описание построено вокруг жизненного цикла аналитической методики и акцентирует, на каких этапах и почему возникает требование к документированию неопределённости измерений (MU).

Схема отражает системный подход к разработке и управлению аналитической методикой в течение всего её жизненного цикла. Ключевая идея: качество измерений не появляется при валидации, а формируется на каждом этапе – от выбора технологии до рутинного мониторинга.

Центральный сквозной элемент – это неопределённость измерений. Без её количественной оценки и документирования невозможно:

- обоснованно установить ATP;
- доказать пригодность методики (fitness for purpose);
- управлять рисками при изменениях.

На первом этапе жизненного цикла определяют критические показатели качества продукта (CQA) и выбирают, какие из них будут контролироваться лабораторными методами. Для каждого лабораторного показателя качества должен быть установлен допуск (спецификация). Однако знание одного допуска недостаточно. Чтобы стратегия контроля была работоспособной, необходимо заранее определить, с какой неопределённостью должен измеряться данный показатель.

На уровне стратегии контроля фиксируется требование к максимально допустимой MU для каждого метода (например, «относительная расширенная MU не должна превышать 2% от номинала»). Это создаёт «входной фильтр» для всех последующих этапов.

Далее на основе предыдущих знаний (внутренних и из литературы) выбирают аналитическую технологию (ВЭЖХ, ГХ, титрование и т.д.). Затем проводят оценку рисков: какие источники неопределённости могут повлиять на результат. Оценка рисков должна быть количественной или полуколичественной. Необходимо установить, какой вклад в суммарную неопределённость вносит каждый источник (оператор, оборудование, реактивы, пробоподготовка и т.д.) и какие источники являются доминирующими. Ре-

зультаты оценки рисков документируются с указанием идентифицированных источников неопределённости, предполагаемой величины их вклада и мер по снижению наиболее значимых вкладов. Этот документ – первое системное описание неопределённости на этапе разработки.

Далее формируется ATP (Analytical Target Profile, Аналитический целевой профиль). ATP – это формальное описание того, что должна измерять методика и с какой гарантией. ATP включает:

- измеряемый параметр;
- диапазон измерений;
- максимально допустимую неопределённость сообщаемого результата.

ATP – это прямой и самый важный узел, связывающий неопределённость измерений с качеством. Если в ATP не зафиксирована целевая неопределённость, то невозможно спроектировать методику, доказать её пригодность, а также управлять риском ложного брака или пропуска брака.

ATP документально фиксирует количественное значение MU (например, «расширенная неопределённость $U \leq 1.5\%$ отн., $k=2$»). Этот документ становится основным критерием для всех последующих этапов (разработки, валидации, мониторинга).

После формирования ATP внутри выбранной технологии определяют конкретные операционные параметры и стратегию контроля: параметры пригодности системы, количество параллельных экспериментов и т.д. Ключевым аспектом стратегии контроля аналитической методики является поддержание заданной ATP неопределённости в пределах установленных параметров. Внутренняя документация (например, методики, стандартные операционные процедуры) должна включать в себя расчётную модель MU или содержать ссылку на неё. Кроме того, необходимо задокументировать обоснование того, почему выбранная стратегия контроля обеспечивает достижение целевого значения MU.

Любые изменения в продукте, процессе, оборудовании, реактивах или самой методике проходят через управление изменениями (change control). Изменения почти всегда влияют на MU. В заявке на изменение обязательно оценивается влияние на MU. Если MU выходит за пределы, заданные ATP, изменение либо не утверждается, либо требует повторной валидации. Результаты этой оценки документируются.

Для любой аналитической методики проводится валидация. Валидация подтверждает, что методика пригодна для цели. Классические валидационные параметры: специфичность, линейность, правильность, прецизионность, воспроизводимость. Современный подход требует, чтобы валидация напрямую подтверждала соответствие ATP, включая целевой показатель MU. Доверительные интервалы для правильности и прецизионности должны быть совместимы с заданной MU. В отчёте по валидации рассчитывается и документируется неопределённость метода (как правило, на основе данных по прецизионности и правильности). Также документируется вывод о том, что рассчитанная MU меньше или равна целевой MU из ATP.

После всех выше указанных процедур методика используется в рутинном контроле качества. Проводится мониторинг её стабильности (контрольные карты, периодические переоценки). Неопределённость измерений не является статической характеристикой. Она может дрейфовать из-за износа оборудования, смены реактивов, человеческого фактора. Мониторинг должен выявлять тренды увеличения неопределённости до того, как они приведут к несоответствию АТР. В рутинной документации (протоколы анализа, журналы) либо должна приводиться неопределённость для каждого результата (например, «100.2 ± 2.1 мг, k=2»), либо указывается, что MU контролируется и находится в установленных пределах [5, 6]. При обнаружении выхода MU за допустимые границы инициируется процедура корректирующих действий (CAPA), что это тоже документируется.

Лаборатория должна вести базу знаний (knowledge management system), где накапливаются данные о MU по разным методам, оборудованию, реактивам. Это позволяет делать обоснованные оценки без повторных дорогостоящих экспериментов [7].

Приведённая схема является не просто последовательностью действий, а система управления качеством измерений. Неопределённость измерений выступает в ней как цель, инструмент проектирования и оценки рисков, как критерий валидации и как метрика мониторинга. Документирование MU на каждом этапе – способ сделать управление качеством измерений объективным, прослеживаемым и пригодным для защиты перед регуляторами.

Таким образом, в соответствии с современными стандартами фармацевтическая лаборатория обязана выдавать результат, сопровождённый информацией о неопределённости, а метод должен быть спроектирован так, чтобы неопределённость не превышала установленного спецификацией допустимого предела.

Введение новых требований сталкивается с рядом проблем. Во-первых, возникает методологический разрыв, вызванный отсутствием унифицированных и простых в применении внутрилабораторных методик расчёта неопределённости измерений для специфических фармацевтических методов. Как следствие, появляется необходимость в автоматизации сбора данных для расчёта неопределённости. Во-вторых, актуализируется и кадровый вопрос: химики-аналитики могут быть недостаточно компетентны в области статистических методов оценки неопределённости.

В настоящее время фармацевтическое регулирование претерпевает трансформацию, сменяя акцент с простого соблюдения предписаний на управление качеством, основанное на анализе данных. В этом контексте концепция неопределённости измерений приобретает центральное значение как инструмент объективной оценки рисков, связанных с принятием решений о соответствии партий продукции. Она также способствует обеспечению прослеживаемости результатов измерений, сопоставимости данных между различными лабораториями и внедрению принципов «Качество через проектирование» (Quality by Design) в фармацевтическом анализе. Неопределённость измерений перестаёт

быть опцией и становится обязательным требованием для поддержания аккредитации и соответствия требованиям GMP. Перспективным направлением является создание автоматизированных модулей расчёта неопределённости измерений в составе электронных лабораторных журналов.

Список литературы

1. USP General Chapter<1220>Analytical Procedure Life Cycle [Текст] / United States Pharmacopeial Convention. – Rockville : USP, 2022. – (USP–NF 2022, Issue 1 ; official from May 1, 2022).
2. USP General Chapter<1225>Validation of Analytical Procedures [Текст] : Proposed Revision / United States Pharmacopeial Convention. – Pharmacopeial Forum. – 2025. – Vol. 51, No. 6. – Comment period until January 31, 2026.
3. ICH. Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology Q2(R2) [Текст] / International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use. – Geneva : ICH, 2023. – 28 p.
4. ICH. Analytical Procedure Development Q14 [Текст] / International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use. – Geneva : ICH, 2023. – 32 p.
5. BIPM. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [Текст] / Joint Committee for Guides in Metrology. – 1st ed. – Sèvres : BIPM, 2008. – 134 p. – (JCGM 100:2008).
6. EURACHEM / CITAC. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement [Текст] / ed. by S. L. R. Ellison, A. Williams. – 3rd ed. – 2012. – 141 p. – ISBN 978-0-948926-30-3.
7. EMA. Revision of EudraLex Volume 4 – GMP Guidelines: Chapter 4, Annex 11 and New Annex 22 (Artificial Intelligence) [Текст] : Public consultation, July 2025 / European Medicines Agency, Pharmaceutical Inspection Co-operation Scheme. – Geneva, 2025.

Черкин А.М.
студент
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
artemcherkin2004@mail.ru
Фахрутдинова А.А.
ассистент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
arinapyfik@yandex.ru

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ: СУТЬ, ПРИМЕНЕНИЕ И МЕТОДИКА

Аннотация. В статье рассматриваются понятие тепловизионного контроля, его применение, виды дефектов и оформление результатов измерений. Текст посвящён тепловизионному контролю – методу обследования электрооборудования, основанному на измерении температуры без непосредственного контакта с поверхностью ограждающих конструкций при помощи тепловизора. В материале подробно раскрываются: Суть метода,

а именно принцип работы тепловизора и его ключевые возможности. Преимущества метода: скорость диагностики (хватает нескольких минут), безопасность (замеры производятся на расстоянии), непрерывность работы оборудования (не требуется отключение от сети), наглядность результатов (тепловая карта), универсальность (подходит для оборудования с напряжением до и свыше 1 кВ), экономичность (предупреждение повреждений снижает затраты на ремонт), раннее обнаружение дефектов. Также рассматриваются: этапы проведения контроля. Типичные дефекты, способы их устранения, рекомендации по проведению измерений. И почему он ещё используется.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, виды дефектов, измерения, перегрев, кабель, изоляция, электрооборудование.

Cherkin A.M.
Student
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
artemcherkin2004@mail.ru
Fakhrutdinova A.A.
Assistant of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
arinapyfik@yandex.ru

THERMAL IMAGING CONTROL OF ELECTRICAL EQUIPMENT: THE ESSENCE, APPLICATION AND METHODOLOGY

Abstract. The article discusses the concept of thermal imaging control, its application, types of defects and design of measurement results. The text is devoted to thermal imaging control, a method of examining electrical equipment based on measuring temperature without direct contact with the surface of enclosing structures using a thermal imager. The material reveals in detail: The essence of the method, namely the principle of operation of the thermal imager and its key features. Advantages of the method: diagnostic speed (several minutes are enough), safety (measurements are made at a distance), continuity of equipment operation (no disconnection from the mains is required), clarity of results (heat map), versatility (suitable for equipment with voltages up to and above 1 kV), cost-effectiveness (damage prevention reduces repair costs), early detection of defects. The following stages of control are also considered. Typical defects, ways to eliminate them, and recommendations for measurements. And why it's still in use.

Keywords: thermal imaging control, types of defects, measurements, overheating, cable, insulation, and electrical equipment.

Тепловизионный контроль – метод обследования, который основан на дистанционном измерении тепловизором температур на поверхности ограждающих конструкций. Тепловизор – устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета. Это позволяет: Быстро выявлять перегревы и аномалии; определять точное местоположение потенциальных дефектов; проводить диагностику без отключения оборудования.

Метод широко используется для контроля:

Линий электропередач:

1. воздушные ЛЭП 110 кВ (например, линия Барнаул – Рубцовск).
2. кабельные ЛЭП в городской черте (подземные силовые кабели 10 кВ).
3. магистральные ЛЭП сверхвысокого напряжения 500 кВ (например, транзит энергосистем Сибири, Казахстана, Урала).
4. распределительные воздушные линии 10 кВ в сельской местности.

Распределительных устройств:

1. РУ 10 кВ на трансформаторной подстанции;
2. щиты распределительные ЩО-70 в промышленных зданиях;
3. КРУ (комплектные распределительные устройства) 6–10 кВ на предприятиях;
4. ГРЩ (главные распределительные щиты) в жилых комплексах.

Силовых трансформаторов:

1. трёхфазный масляный трансформатор ТМГ-1000/10/0,4 кВ;
2. сухой трансформатор ТСЗ-160/10/0,4 кВ для внутренних установок;
3. автотрансформатор АТДЦТН-200000/220/110 кВ на подстанциях;
4. двухобмоточный трансформатор ТМ-630/10/0,4 кВ для питания микрорайонов.

Контроль состояния воздушных линий электропередачи:

1. ВЛ 110 кВ
2. ВЛ 330 кВ

Электродвигателей (переменного и постоянного тока):

1. асинхронный двигатель переменного тока АИР180М4 (30 кВт, 1500 об/мин);
2. синхронный двигатель СДК2-16-34-10У3 (1600 кВт) для компрессоров;
3. двигатель постоянного тока П-41 (11 кВт) для регулируемых приводов;
4. взрывозащищённый двигатель BAO2-280S6 для нефтехимии.

При монтаже проводки и оборудования:

1. проверка состояния кабелей – проверка оборудования на наличие износа, механических повреждений, перекручивания или перетирания проводников.
2. осмотр соединений – проверка всех соединений на надёжность закрепления и изоляции, отсутствие у проводников оголённых частей.

Автоматических и ручных выключателей:

1. автоматический выключатель ВА57-35 на 250 А;
2. воздушный выключатель ВВЭ-М-10-31,5/2500 У2;
3. рубильник РПС-4 с предохранителями на 400 А;
4. модульный автомат SH201L C16 (16 А) для щитков.

Контактных соединений и разъединителей:

1. разъединитель РЛНД-10/400 У1 (наружной установки);
2. шинные контакты в КРУ типа К-59;

3. клеммные колодки ЗНИ-10 для монтажа в щитах;
4. болтовые соединения шин в РУ 10 кВ.

Кабельных сетей и их соединений:

1. силовой кабель ААБл-10 1×120 мм² (алюминиевая жила, бумажная изоляция);
2. кабель ВВГнг-LS 3×95 + 1×50 мм² (медный, негорючий);
3. соединительная муфта 10 кВ типа 1СТп-10-70/120-Б;
4. концевая муфта внутренней установки 10 кВ.

Выявление дефектов в реконструируемых и вновь сооружаемых электроустановках:

1. перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер.
2. перегревы наружных и внутренних контактных соединений.
3. перегревы силовых кабелей, оценка пожароопасности кабелей.

Предохранителей, конденсаторов, вентилей:

1. предохранитель ПКН 001-10 У3 (для защиты трансформаторов напряжения);
2. конденсатор КПС-0,4-20-3У3 (компенсация реактивной мощности);
3. вентиль (тиристор) Т143-630-16 (630 А, 1600 В);
4. плавкая вставка ППН-33 63 А для модульных щитов.

Контроль проводится как на этапе установки (для выявления слабых мест до начала эксплуатации), так и в процессе работы оборудования – для предотвращения аварий.

Преимущества метода:

Скорость – диагностика проводится за несколько минут; безопасность – замеры проводятся дистанционно, без прямого контакта с проводами; непрерывность работы – оборудование не требуется отключать; наглядность – результаты отображаются в виде тепловой карты; универсальность – подходит для оборудования, напряжение которого принимает значения до и свыше 1 кВ; экономичность – решает проблему дорогостоящего ремонта за счёт предупреждения возможных повреждений; выявление скрытых дефектов – например, утечек тепла, перегревов, влажных участков, которые не видны невооружённым глазом; раннее обнаружение – метод позволяет выявить дефект на ранней стадии, когда он ещё не привёл к необратимым последствиям. (Скорость, позволяющая проводить диагностику за несколько минут. Безопасность, за счёт проверки оборудования на расстоянии, без прямого контакта с поверхностью приборов, также, контроль можно проводить без остановки оборудования. Тепловая карта отображает результаты. Тепловизионный контроль универсален, его можно использовать на оборудовании с напряжением до и свыше 1 кВ, благодаря нему, работники вовремя выявляют неисправности оборудования и компании экономят не тратят деньги на ремонт.)

Этапы обследования:

Перед тем как начать работу нужно: оценить условия окружающей среды, выбрать оборудование(тепловизор) с подходящими характеристиками, определить точки замера. Во время измерения нужно: отойти на безопасное расстояние от исследуемой поверхности, а также учитывать коэффициент излучения материалов, скорректировать параметры прибора под условия среды.

Анализ данных:

Полученные данные нужно сравнить с нормативными, выявить аномальные зоны нагрева, а после, определить причины отклонений.

Условия:

На точность измерений влияют скорость ветра, снижающая температуру в несколько раз, солнечное излучение, создающее ложный нагрев. Коэффициент излучения материала поверхности, характеризующий способность материала излучать тепловую энергию по сравнению с абсолютно чёрным телом при одной и той же температуре, расстояние до объекта измерения.

Некоторые рекомендации:

Измерения следует проводить в сухую погоду при скорости ветра не более 8 м/с.

Измерение во время дождя, тумана или снега не рекомендуется, из-за влаги, поглощающей инфракрасное излучение и искажает результаты.

При работе с электрооборудованием под напряжением необходимо соблюдать безопасные расстояния (для 110 кВ – не менее 1 м), использовать средства индивидуальной защиты, работать в присутствии оперативного персонала.

Виды дефектов и их устранение.

Ослабленные контактные соединения в распределительных щитах и шкафах (рис. 1).

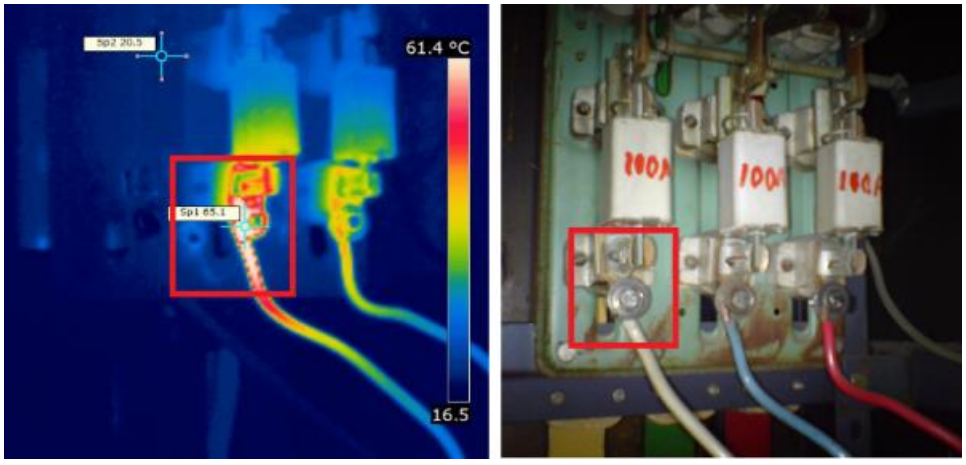


Рис. 1. Нагрев в контактном соединении

Этот дефект нужно исправить следующим способом: проверить затяжку контактов, для этого нужно применить динамометрический ключ.

Момент затяжки провода в 1,5 мм²- 0,8 Н•м, в 2,5 мм²- 1,2 Н•м. Далее нужно очистить контактные поверхности от смазки и грязи, удалить ржавчину со стальных шин и оксидную плёнку – с алюминиевых. Также нужно предохранять провода от выдавливания из контактного соединения, с помощью фасонной шайбы. В первую очередь, предохранение нужно для многопроволочных жил.

Ослабление болтовых соединений, коррозия, неправильный выбор сечения проводника увеличивают переходное сопротивление и вызывают локальный перегрев.

Данный дефект нужно исправить следующим образом: устранить причину перегрева, для этого нужно ослабить соединения, далее очистить коррозию и скорректировать неправильный расчёт сечения проводника.

Участки кабеля с повреждённой изоляцией (рис. 2).

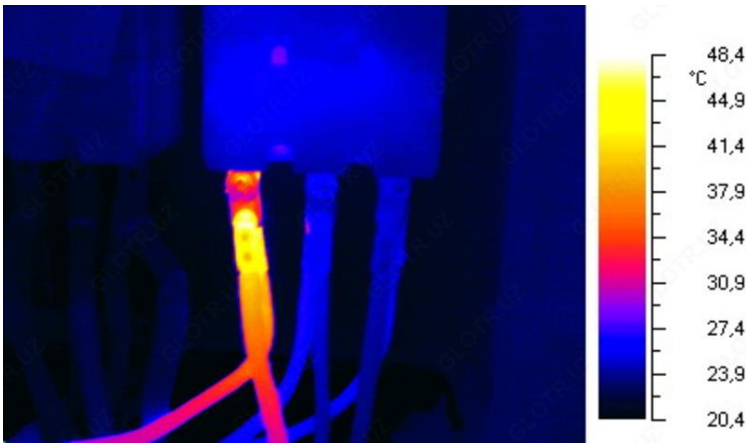


Рис. 2. Кабель с повреждённой изоляцией

Повреждённую изоляцию кабеля можно исправить с помощью изоляционной ленты или термоусадочной трубки. Перед началом ремонта необходимо обесточить участок проводки, также нужно оценить степень повреждения: если повреждена только внешняя изоляция, а проводник внутри не оголён, то задача упрощается. В другом случае, потребуется замена или более сложный ремонт.

Повреждение изоляции, вызванное механическим воздействием, старением или воздействием окружающей среды, приводит к увеличению токов утечки и, как следствие, к нагреву кабеля.

Для решения этой проблемы нужно провести тепловизионную диагностику, позволяющую обнаружить проблемные участки, даже если они скрыты под землёй или в кабельных каналах. После, заменить повреждённый участок кабеля, либо восстановить изоляцию при помощи термоусадочных муфт, соблюдать эксплуатационные требования к кабелю, зная условия по току, рабочему напряжению, окружающей температуре, влажности и правилам монтажа. Использовать защитные трубы или кабельные каналы,

защищающий кабель от механических, световых и атмосферных воздействий, а также от грызунов. Не монтировать кабель вблизи систем отопления и водоснабжения, не допускать сращивания медных и алюминиевых жил, используя стандартные наконечники, зажимы и колодки для соединения проводников.

Перегрев обмоток трансформатора (рис. 3).

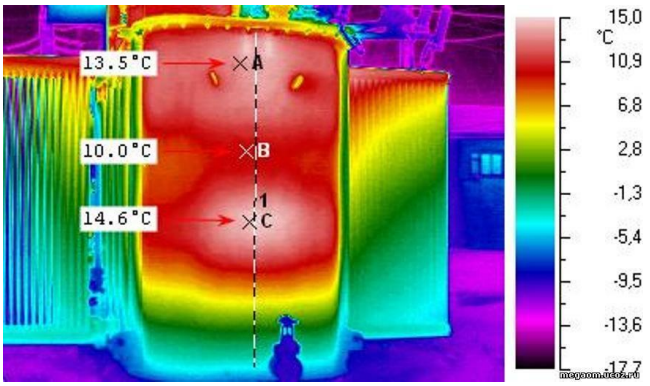


Рис. 3. Перегрев тепловизора

Чтобы решить эту проблему нужно проверить и восстановить систему охлаждения, проверив все компоненты системы, включая вентиляторы, радиаторы и масляные насосы на предмет их функциональности, а после очистить их. Дальше нужно отремонтировать или заменить, в зависимости от степени повреждения, неисправные компоненты. А также проводить профилактику и регулярное техническое обслуживание.

Неисправности системы охлаждения (препятствия потоку охлаждающей жидкости, неисправности термостата и управления, утечки масла и загрязнение охлаждающей среды) могут вызвать перегрев (рис. 4).

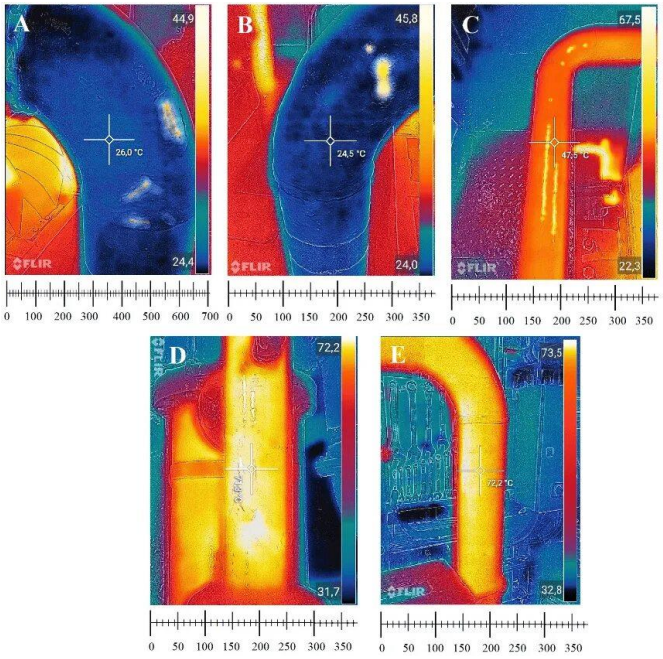


Рис. 4. Система охлаждения

Для решения этой проблемы нужно модернизировать систему охлаждения, например добавив вентиляторы, направляющие поток воздуха на корпус оборудования, а после необходимо очистить вентиляционные каналы, с помощью регулярной продувки сжатым воздухом или вакуумной очистки вентиляционных отверстий, чтобы обеспечить нормальное охлаждение.

Дисбаланс в трёхфазных цепях (рис. 5).

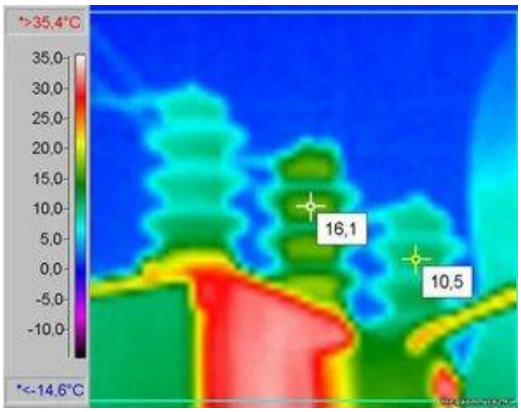


Рис. 5. Перегрев в трёхфазных сетях

Исправить эту проблему нужно, перераспределив нагрузку вручную, например, равномерно распределив мощные потребители по трём фазам на уровне водного щитка, а не розеток. Использовать симметрирующий трансформатор, выравнивающий систему в автоматическом режиме, также нужно использовать симметрирующий трансформатор, динамически корректирующий дисбаланс, регулируя нагрузку на каждой фазе.

Создаёт на термограмме чёткую асимметричную картину, где перегруженная фаза заметно выделяется на фоне нормально нагруженных.

Для корректирования этой неисправности нужно использовать автоматические выключатели, размыкающие цепь при недопустимо высоком напряжении, предотвращая аварийные ситуации и поломку оборудования. Также используют стабилизатор напряжения и реле контроля фазного тока, первый предотвращает ассиметрию в перераспределении нагрузок, второй автоматически отслеживает уровень напряжения, в случае резких скачков, превышающих допустимые значения, оперативно размыкает цепь.

Некорректная работа защитных устройств (автоматы, реле) (рис. 6, 7).

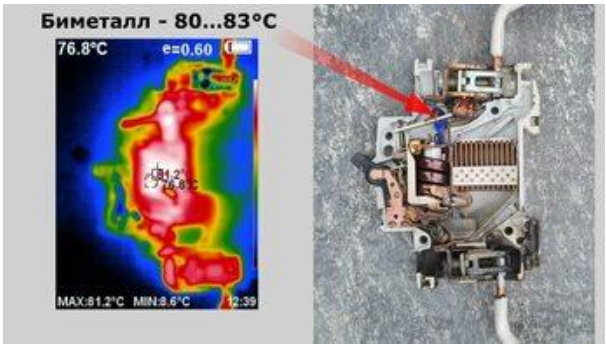


Рис. 6. Автомат

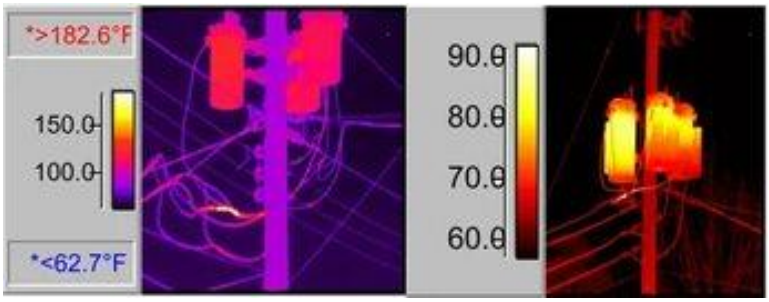


Рис. 7. Реле

Для решения этой проблемы нужно проверить температуру контактов тепловизором, разделить нагрузку на разные автоматы для каждого мощного потребителя. Также, если защита срабатывает из-за включения одного электроприбора, нужно убедиться в его исправности, выключив из розетки и проверить работу без её нагрузки. Если отключение не повторилось, выключатель работает в штатном режиме.

Для решения этой задачи нужно проверить напряжение источника питания мультиметром, если напряжение ненормальное, отрегулировать выходное напряжение источника питания, либо заменить его.

Тепловизионный контроль электрооборудования – эффективный и современный метод диагностики, благодаря которому специалистам удаётся вовремя выявлять дефекты и не допускать аварийных ситуаций без остановки его работы. Метод широко применяется для проверки различных устройств, среди которых: линии электропередачи, распределительные устройства, силовые трансформаторы, кабельные сети и их соединения, электродвигатели, контактные соединения и разъединители, автоматические и ручные выключатели и т.д. Во время обследования можно выявить распространённые дефекты: ослабленные участки охлаждения, контактные соединения, кабеля с повреждённой изоляцией, перегрузки электросети, перегрев обмоток трансформатора, повреждение изоляции, некорректная работа защитных устройств, дисбаланс в трёхфазных цепях. Для точности результатов важно учитывать следующие условия: проводить обследования в сухую погоду, скорость ветра не должна превышать 8 м/с, избегать измерений в плохую погоду: дождь, туман, снег, соблюдать безопасные расстояния при работе с электрооборудованием под напряжением (например, если 110 кВ, то не менее 1 м), работать под наблюдением оперативного персонала. Регулярное использование тепловизионного контроля позволяет: снизить риск аварийных отключений, оптимизировать затраты на ремонт и техническое обслуживание, повысить надёжность работы электрооборудования, продлить его срок службы, обезопасить персонал и инфраструктуру. Из этого следует, что внедрение данного метода диагностики в практику технического обслуживания электроустановок является экономически оправданным и целесообразным решением для предприятия любой отрасли.

Список литературы

1. Тепловизионная диагностика электрооборудования – https://elektrolab.ru/services/teplovizionnye-obsledovaniya/teplovizionnaya-diagnostika-elektrooborudovaniya/

2. Тепловизионный контроль электрооборудования:

как искать дефекты и зачем измерять токи при съемке электрощитов тепловизором – https://electrozamer.ooo/vidi-rabot/teplovizionniy-kontrol-elektrooborudovaniya

3. Тепловизионный контроль электрооборудования – https://ufa.elaba24.ru/service/teplovizionnoe-obsledovanie/teplovizionnyj-kontrol/

4. Тепловизионный контроль электрооборудования: полное руководство – https://skomplekt.com/teplovizionnyj-kontrol-ehlektrooborudovaniya/

5. Тепловизионное обследование-https://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловизионное_обследование

6. Методика термографического контроля электротехнического оборудования-https://m-e-g-a.ru/elektrolaboratoriya/metodika-provedeniya-teplovizionnogo-obsledovaniya-elektrooborudovaniya

7. Тепловизионная диагностика кабельных линий и соединений: выявление дефектов по температуре. Бесконтактный метод контроля для надёжной работы электросетей- https://ek-top.ru/articles/elektrotehnika/thermal-imaging-cable-lines-connections/

8. Как применять тепловизор для обследования электрооборудования- https://test-energy.ru/diagnostika-neispravnostej-v-ehlektrotekhnicheskom-oborudovanii-s-pomoshchyu-teplovideniya/

Зеньков Е.В.
д.т.н., доцент кафедры «Управление качеством и инженерная графика»
Иркутский государственный университет путей сообщения
Россия, Иркутск
Zenkov_EV@irgups.ru
Фалеева Е.Ю.
студент
Иркутский государственный университет путей сообщения
Россия, Иркутск
lena37881@gmail.com

ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПАССАЖИРСКОМ КОМПЛЕКСЕ: ОПЫТ АО «ФПК» В УСЛОВИЯХ НОВЫХ ВЫЗОВОВ

Аннотация. В статье исследована трансформация системы оценки эффективности деятельности национального пассажирского железнодорожного перевозчика АО «ФПК» в период с 2013 по 2024 год. Выявлено противоречие между устойчивым ростом доходов компании (на 90,1%) и сокращением инвентарного парка вагонов (на 29,4%), что не поддается объяснению в рамках традиционной экстенсивной модели развития. На основе анализа отчетных данных компании и применения методов корреляционного анализа установлено, что ключевыми факторами роста эффективности выступили показатели точности сервисных измерений индекс удовлетворенности пассажиров (CSI) и индекс потребительской лояльности (NPS), а

также метрики безопасности движения. Показано, что опережающий рост доходов в дерегулированном сегменте перевозок (вагоны СВ и купе) происходил на фоне стабильно высокого CSI и масштабных инвестиций в обновление подвижного состава. В условиях новых вызовов санкций, закрытия аэропортов и необходимости импортозамещения точность измерений качества сервиса и безопасности становится основным драйвером экономической эффективности, заменяя традиционные объемные метрики.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, пассажирские перевозки, точность измерений, индекс удовлетворенности пассажиров, безопасность движения, сегменты.

Zenkov E.V.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Quality Management and Engineering Graphics
Irkutsk State University of Railway Transport
Russia, Irkutsk
Zenkov_EV@irgups.ru
Faleeva E.Yu.
Student
Irkutsk State University of Railway Transport
Russia, Irkutsk
lena37881@gmail.com

TRANSFORMATION OF MEASUREMENT ACCURACY AND EFFICIENCY IN THE PASSENGER COMPLEX: THE EXPERIENCE OF JSC "FPC" IN THE CONTEXT OF NEW CHALLENGES

Abstract. The article examines the transformation of the performance assessment system of the national passenger railway carrier JSC "FPC" in the period from 2013 to 2024. A contradiction has been revealed between the steady growth of the company's revenues (by 90.1%) and the reduction of the stock of wagons (by 29.4%), which cannot be explained within the framework of the traditional extensive development model. Based on the analysis of the company's reporting data and the use of correlation analysis methods, it was found that the key factors for efficiency growth were the accuracy of service measurements, the passenger satisfaction index (CSI) and the consumer loyalty index (NPS), as well as traffic safety metrics. It is shown that the outstripping revenue growth in the deregulated segment of transportation (SV and compartment wagons) occurred against the background of consistently high CSI and large-scale investments in the renewal of rolling stock. In the face of new challenges from sanctions, airport closures, and the need for import substitution, the accuracy of service quality and safety measurements is becoming the main driver of economic efficiency, replacing traditional volumetric metrics.

Keywords: railway transport, passenger transportation, measurement accuracy, passenger satisfaction index, traffic safety, segments.

Транспортная отрасль России работает в условиях высокой нестабильности внешней среды, вызванной санкционными ограничениями, перестройкой логистических маршрутов и изменением структуры пассажиропотоков, для национального перевозчика дальнего следования АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК») эти вызовы наложились на необходимость сохранять транспортную доступность и обеспечивать рентабельность операционной работы. В такой ситуации привычная система оценки

эффективности, построенная на объемных показателях грузоперевозок (вагоно-километры, размер парка, количество перевезенных пассажиров), перестает быть надежным инструментом для принятия стратегических решений. Десятилетиями успешность железнодорожного предприятия измерялась экстенсивными метриками, то есть больше вагонов, больше маршрутов, больше пассажиров, и этот подход работал при стабильном спросе и предсказуемой экономике, но события 2020–2024 годов, то есть пандемия, закрытие аэропортов на юге страны, технологические санкции, они заставили пересмотреть саму логику измерений [1]. На первый план вышли показатели, отражающие не количество, а качество использования ресурсов, а именно точность графика, удовлетворенность пассажиров, безопасность и эффективность вложений, особенно ярко проблема измерений проявляется на примере АО «ФПК», так анализ отчетности компании за двенадцать лет (2013–2024 годы) выявил парадоксальную картину, мы проанализировали и выявили, что доходы от основной деятельности устойчиво росли с 196,1 млрд руб. в 2013 году до 372,9 млрд руб. в 2024 году, то есть прибавили 90,1%, в то же время инвентарный парк пассажирских вагонов сократился с 23,4 до 16,5 тысяч единиц, потеряв почти треть ресурсов, это очень важный показатель для ФПК [2], [3] [4]. Такое расхождение, это прямой рост финансов при снижении главного производственного актива и просто невозможно объяснить в рамках классической экстенсивной модели, как коррелируют между собой эти параметры, поэтому требуется поиск новых факторов, обеспечивших рост эффективности, для наглядности ключевые показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение ключевых показателей АО «ФПК»

Показатель	2020	2021	2022	2023	2024
Доходы от основной деятельности, млрд руб.	130,9	188,2	250,5	315,8	372,9
Пассажирооборот, млрд пасс.-км	48,2	67,3	81,2	91,4	95,8
Инвентарный парк вагонов, тыс. ед.	16,6	15,8	16,1	16,3	16,5
Транспортные происшествия (Холдинг РЖД), ед.	722	641	632	639	535
Индекс удовлетворенности пассажиров (CSI), баллы	87,8	88,4	87,6	89,6	88,2

Данные, представленные в таблице 1, наглядно демонстрируют особенности экономической модели роста АО «ФПК» в условиях нестабильности. Мы видим значительный рост финансовых и операционных показателей доходы компании увеличились в 2,8 раза, а пассажирооборот вдвое. Однако при этом количественные параметры основного производственного ресурса, а именно инвентарного парка вагонов, практически не изменились,

сократившись всего на 0,6% за тот же период, но стоит заметить, что средний возраст парка при этом оставался стабильным около 17 лет, и эти факты позволяют сделать вывод, что рост не был обеспечен масштабным экстенсивным обновлением или наращиванием активов. Расхождение между динамикой финансовых результатов и объемом задействованных физических активов указывает на повышение эффективности, более того, на фоне стабильности парковой деятельности произошло существенное сокращение числа транспортных происшествий (на 25,9%), а индекс потребительской удовлетворенности (CSI) стабильно сохранялся на высоком уровне 88–89 баллов. Можно выдвинуть гипотезу о том, что ключевым фактором роста выручки и производительности в рассматриваемом периоде выступил такой фактор, как переход от приоритета объемных метрик к управлению, сосредоточенному на основе показателей точности и безопасности, а выявленное противоречие определяет цель настоящего исследования, количественно оценить влияние показателей точности измерений (CSI, NPS, уровень аварийности) на финансовые результаты компании, представленные на рисунке 1.

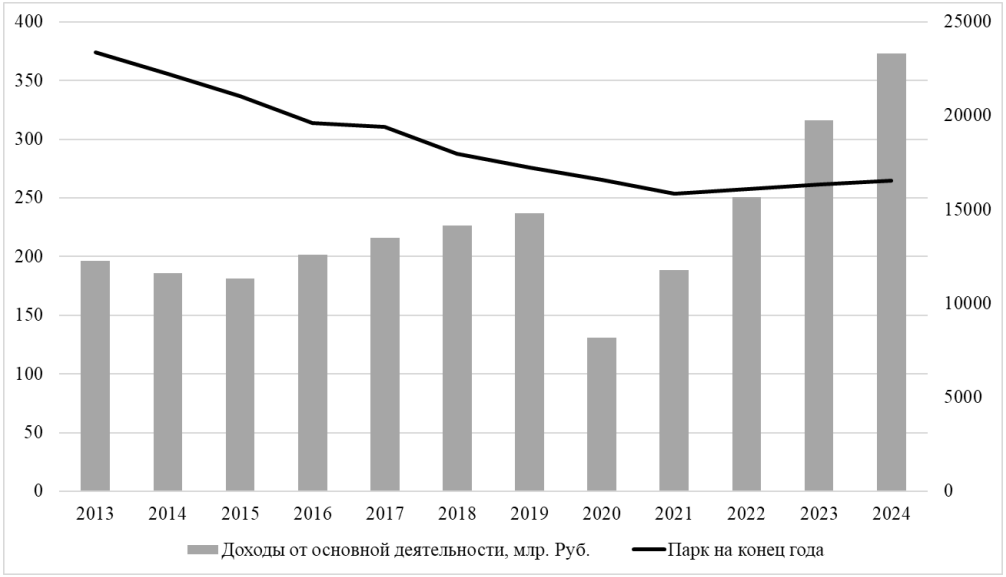


Рис. 1. Динамика доходов от основной деятельности и инвентарного парка вагонов АО «ФПК»

На рисунке 1 четко видно, как после 2017 года ситуация начала меняться, раньше доходы и количество вагонов росли и падали синхронно, но потом эти показатели разрознились в разные стороны. Интересный аспект, который мы увидели в ходе анализа, что парк вагонов постепенно сокращается (с 21,6 тыс. до 16,5 тыс. единиц), а вот выручка, наоборот, уверенно увеличивается. Даже пандемия в 2020 году не сбила этот тренд надолго, в итоге к 2024 году заметен огромный разрыв, то есть вагонов стало меньше почти на четверть (на 23,6%) по сравнению с пиком 2013 года, зато доходы

за этот же период подскочили на 90,2% [5]. Главная причина этого феномена, это вагоны стали значительно качественнее, компания планомерно обновляла парк, то есть заменяла старые вагоны на современные, где были установлены кондиционеры, биотуалеты, розетки для зарядки гаджетов и сервис «Попутчик» [6]. Если посмотреть на цифры, то в 2013 году кондиционеры были только в каждом втором вагоне (56%), а сейчас они есть почти у всех (92,4%). С экологичными туалетами ситуация улучшилась, и доля выросла до 86%. Это благоприятно сказалось на деятельности РЖД, новый подвижной состав гораздо реже ломается и его дешевле обслуживать, что снижает операционные расходы, и во-вторых, за комфорт пассажиры готовы платить больше, в совокупности эти факторы дают весьма ощутимый рост доходности компании.

Еще одна важная трансформация коснулась системы измерений, РЖД стала активно внедрять клиентские метрики, такие как индекс удовлетворенности пассажиров (CSI) и индекс потребительской лояльности (NPS). В отличие от старых объемных показателей, которые фиксировали лишь факт оказания услуги, CSI и NPS позволяют измерять качество взаимодействия пассажира с компанией на всех этапах поездки от покупки билета до выхода из вагона, и эти показатели контролируются постоянно, представленном на рисунке 2 была выявлена динамика CSI и NPS за период с 2013 по 2024 год [7]. Обращает на себя внимание высокая стабильность индекса удовлетворенности 87–90 баллов, это говорит нам о том, что компании удается удерживать качество сервиса на стабильно высоком уровне, несмотря на внешние факторы. Индекс NPS показывает большую изменчивость со временем, в 2021 и 2023 годах он достигал отметки 50, а это высокий уровень лояльности, но в 2022 и 2024 годах снижался до 43–47, такая динамика может объясняться влиянием внешних факторов, в 2022 году общей экономической неопределенностью и адаптацией к новым условиям, в 2024 году возможным насыщением спроса после рекордного 2023 года и ростом тарифов.

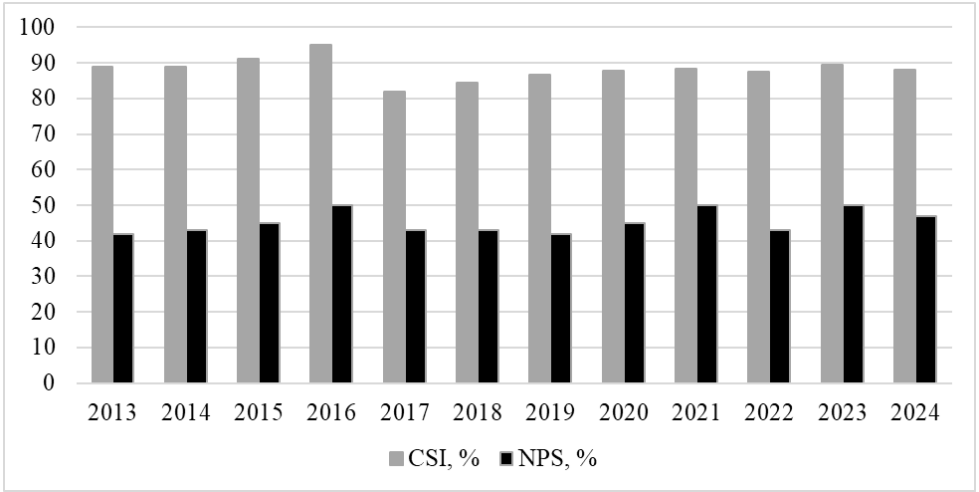


Рис. 2. Динамика индекса удовлетворенности пассажиров и индекса потребительской лояльности

Сопоставление динамики показателей удовлетворенности и доходов не показывает прямой линейной зависимости, однако корреляционный анализ, результаты которого представлены в таблице 2, выявляет умеренную положительную связь (коэффициент 0,58 для CSI и 0,41 для NPS), нам это доказывает тот факт, что повышение удовлетворенности и лояльности пассажиров создает благоприятный фон для роста доходов. Высокие значения CSI и NPS выступают необходимым условием для обеспечения возможности гибкого ценообразования в дерегулированном сегменте [8].

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между доходами и показателями точности

Показатель	Коэффициент корреляции с доходами
Пассажирооборот	0,95
CSI	0,58
NPS	0,41
Доля вагонов с кондиционированием	0,87
Доля вагонов с биотуалетами	0,84

Коэффициенты корреляции из таблицы 2 подтверждают, что точность выполнения графиков и качество сервиса напрямую влияют на доходы компании, самая тесная связь ожидаемо наблюдается у пассажирооборота (r=0,95), так как объем перевозок, это главный индикатор выручки. Однако высокие показатели корреляции доходов с оснащенностью вагонов кондиционерами (r=0,87) и биотуалетами (r=0,84) показывают, что техническое состояние парка – это не просто вопрос комфорта, а мощный экономический драйвер [9]. Технологическое оснащение напрямую влияет на готовность пассажиров выбирать услуги перевозчика и оплачивать их. Интересно сравнить влияние индексов CSI и NPS. Корреляция доходов с индексом удовлетворенности (CSI, r=0,58) оказалась выше, чем с индексом лояльности (NPS, r=0,41). Это объясняется разницей в сути показателей: CSI отражает впечатления от конкретной поездки «здесь и сейчас», что сразу сказывается на выборе более дорогого класса вагона и готовности платить по повышенному тарифу, NPS же работает как долгосрочный индикатор, который влияет на частоту повторных поездок и приток новых клиентов в будущем. Чтобы глубже разобраться в этой механике, стоит разделить доходы на регулируемый и дерегулируемый сегменты. В регулируемом секторе (плацкарт и общие вагоны) цены устанавливает государство, что ограничивает финансовую гибкость, а в дерегулируемом сегменте (СВ, купе, скоростные поезда) АО «ФПК» само формирует тарифы, используя динамическое ценообразование. Именно в этом сегменте качество обслуживания и уровень удовлетворенности пассажиров играют ключевую роль в формировании прибыли, что демонстрирует рисунок 3.

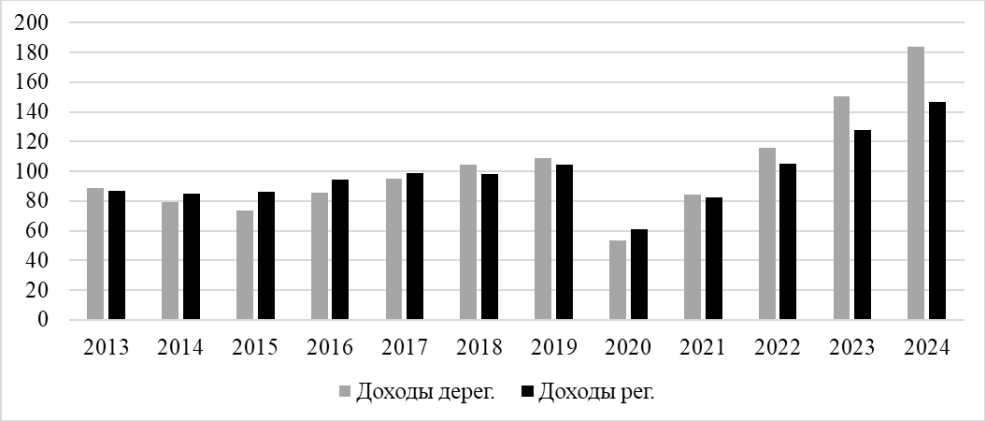


Рис. 3. Динамика доходов АО «ФПК» в регулируемом и дерегулируемом сегментах (2013–2024 гг.), млрд руб.

Если взглянуть на рисунок 3, можно увидеть, как менялись доходы в двух основных сегментах компании, регулируемом (плацкарты и общие вагоны) и дерегулируемом (купе, СВ, скоростные поезда), график очень наглядно показывает, что доходы от более дорогих, дерегулируемых вагонов росли стабильно быстрее на протяжении всего этого времени. Особенно эта разница стала заметна после 2020 года. К 2024 году доходы от купе и СВ достигли внушительной суммы в 184,1 млрд рублей, что почти в 2,1 раза больше, чем в 2013 году, но важно отметить, что при этом доходы от плацкартных вагонов составили 146,5 млрд рублей, показав рост в 1,7 раза. Это означает, что доля более дорогих вагонов в общем пассажирообороте выросла с 31% до 44%. В целом, пассажиры стали чаще выбирать более комфортные и дорогие варианты поездок, примечательно, что это смещение спроса происходило на фоне того, что компания упорно поддерживала высокий уровень удовлетворенности сервисом (CSI) на уровне 87–90 баллов. Такой опережающий рост доходов в сегменте купе и СВ был бы невозможен без серьезных инвестиций, и рисунок 4 показывает, куда компания вкладывала средства за тот же период., мы отчетливо видим, что основная часть инвестиций (более 90%) стабильно направлялась на покупку новых вагонов и их модернизацию, интересно заметить, что в 2023–2024 годах затраты на подвижной состав резко подскочили до 38–56 млрд рублей в год, это вероятно, это связано с тем, что компания начала получать новые вагоны по крупному долгосрочному контракту [10]. Именно эти новые, современные вагоны с кондиционерами, биотуалетами и мультимедийными функциями, скорее всего, в первую очередь попадали в купе и СВ, предлагая пассажирам тот самый повышенный комфорт, за который потребители готовы платить больше.

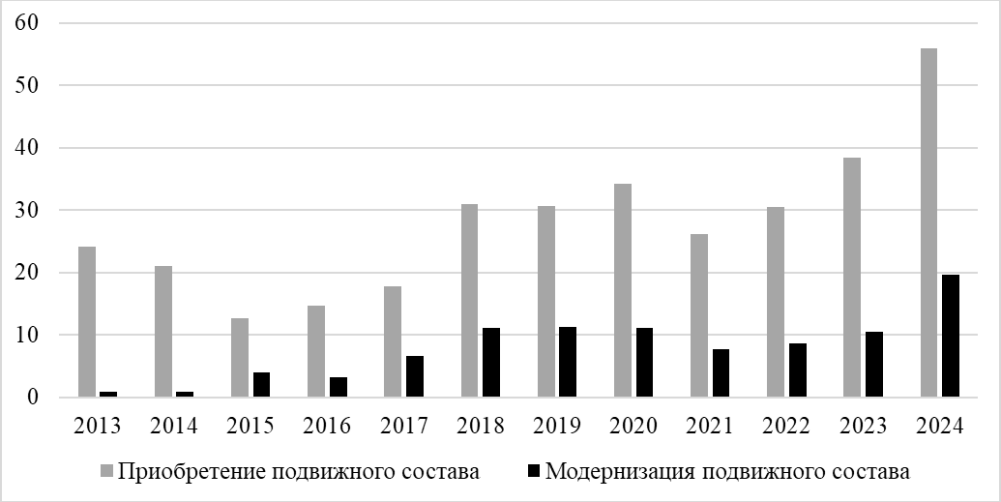


Рис. 4. Структура инвестиционной программы, млрд руб.

Сравнив графики 3 и 4, мы видим четкую закономерность чем больше компания инвестировала в новые, современные вагоны, тем быстрее росли доходы от купе, СВ и скоростных поездов, здесь наблюдается двойной эффект. С одной стороны, такие вагоны привлекают пассажиров, готовых платить за комфорт, с другой стороны, они обходятся дешевле в обслуживании. Когда к этому добавляется высокий уровень сервиса, который мы измеряем через CSI, возникает настоящая синергия, а пассажир получает качественную услугу, остается доволен и в следующий раз снова выбирает ту же компанию, причем часто переключается на более дорогие вагоны. Стабильно высокий индекс удовлетворенности (CSI) стал фундаментом для доверия, благодаря этому компания смогла увеличить долю доходов от более комфортных вагонов, даже при общем сокращении их количества. Доход с каждого пассажиро-километра стабильно рос, что и обеспечило опережающий рост финансовых показателей по сравнению с общим объемом перевозок.

Наше исследование позволило точно оценить, как изменения в системе контроля качества повлияли на финансовые результаты АО «ФПК» с 2013 по 2024 годы. Полученные данные убедительно доказывают, что в условиях новых вызовов, таких как, пандемии, закрытия аэропортов, санкций и импортозамещения, старые, объемные показатели, к примеру, количество перевезенных пассажиров, потеряли свою актуальность. Рост доходов компании в 2,8 раза при одновременном сокращении парка вагонов и сохранении его среднего возраста невозможно объяснить с помощью обычной экстенсивной модели развития [11]. Ключевым фактором роста стало внедрение точных показателей, ранее поминавших в тексте, индекс удовлетворенности пассажиров (CSI) и метрики безопасности, а корреляционный анализ показал прямую и устойчивую связь между CSI и доходами (0,58), а также сильную обратную связь между количеством происшествий и доходами (–0,89). Это однозначно подтверждает, что вложения в качество сервиса и безопасность – это не просто затраты, а реальные инвестиции, которые окупаются

и дают измеримый экономический эффект. Особенно это проявилось в дерегулируемом сегменте, где компания напрямую конкурирует за каждого пассажира, опережающий рост доходов здесь (в 2,1 раза за десять лет) произошел как раз на фоне стабильно высокого показателя CSI и масштабного обновления подвижного состава. Удовлетворенный сервисом пассажир чаще выбирает вагон повышенной комфортности, что напрямую увеличивает доходность. Опыт ФПК и РЖД наглядно демонстрирует, что в современных сложных условиях трансформация и повышение точности измерений, это реальный экономический механизм, который обеспечивает устойчивость и дальнейшее развитие перевозчика.

Список литературы

1. Проскурякова, Е. А. Оценка клиентоориентированности пригородного пассажирского комплекса холдинга "РЖД" / Е. А. Проскурякова // Экономика железных дорог. – 2019. – № 8. – С. 30–38.
2. Годовой отчет АО «Федеральная пассажирская компания» за 2020 год. Москва: АО «ФПК», 2021. 221 с.
3. Годовой отчет АО «Федеральная пассажирская компания» за 2022 год. Москва: АО «ФПК», 2023. 226 с.
4. Годовой отчет АО «Федеральная пассажирская компания» за 2024 год. Москва: АО «ФПК», 2025. 241 с.
5. Годовой отчет АО «Федеральная пассажирская компания» за 2013 год. Москва: АО «ФПК», 2014. 227 с.
6. Жутяева, С. А. Управление продвижением услуг по перевозке пассажиров на железнодорожном транспорте / С. А. Жутяева, Н. А. Лазарева, А. Г. Есина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. – 2025. – № 3. – С. 51–65.
7. Полынская, М. М. Повышение удовлетворенности клиентов как фактор роста экономической эффективности деятельности предприятия / М. М. Полынская, Е. Ю. Фалеева // Научно-технические аспекты комплексного развития железнодорожного транспорта : Материалы XI Международной Научно-практической конференции в рамках XI Международного Научного форума Донецкой Народной Республики "Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие", Донецк, 28–29 мая 2025 года. – Донецк: Донецкий институт железнодорожного транспорта, 2025. – С. 108–110.
8. Фалеева, Е. Ю. Оценка влияния внедрения системы управления качеством на экономические показатели РЖД / Е. Ю. Фалеева // Актуальные проблемы науки и практики: Гатчинские чтения-2025 : Трибуна молодого ученного: сборник научных трудов по материалам XII Международной научно-практической конференции, Гатчина, 29–30 мая 2025 года. Том 2. – Гатчина: Гатчинский государственный университет, 2025. – С. 695–697.
9. Янелис, А. В. Пассажирские железнодорожные перевозки с учетом показателей качества / А. В. Янелис // Актуальные вопросы современной экономики. – 2020. – № 1. – С. 230–235.
10. Консолидированная финансовая отчетность ОАО «Российские железные дороги» и его дочерних компаний за год, закончившийся 31 декабря 2025 г. Москва: ОАО «РЖД», 2026. 115 с.

11. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р // Собрание законодательства РФ. 2021. № 49. Ст. 8265.

Кушнир И.С.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
kushn1r_ivan@mail.ru
Адылина А.П.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
dmitr1eva@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ 3D-СКАНИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТА ПРИ АВТОНОМНОМ И ПРОМЕЖУТОЧНОМ ИЗМЕРЕНИИ ДЕТАЛЕЙ, НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Аннотация. В данной статье представлены результаты геометрического анализа детали, напечатанной на 3D-принтере, измеренные с помощью контактного зонда на координатно-измерительной машине и 3D-сканера со структурированным светом, а также анализ ошибок, включающий статистическое сравнение измеренных геометрических отклонений. Этот анализ затем используется для определения того, являются ли 3D-сканеры со структурированным светом достаточно надежными для проведения геометрического определения размеров и допусков для конкретных элементов. В статье также представлены результаты 3D-сканирования в процессе производства и проведено их сравнение с результатами 3D-сканирования вне процесса производства для оценки пригодности данного метода в процессе производства для всестороннего анализа геометрических отклонений. Кроме того, в исследовании оценивается влияние разрешения сканирования, отражательной способности поверхности и сложности детали на повторяемость измерений. Сравнительная оценка выявляет потенциальные систематические ошибки, присущие оптическим методам, и количественно определяет уровень согласования между контактными и бесконтактными методами. Полученные результаты подтверждают методологию интеграции сканирования со структурированным светом в рабочие процессы обеспечения качества, особенно на промежуточных этапах контроля, что позволяет сократить узкие места в постпроцессном контроле и обеспечить более быструю обратную связь для оптимизации процесса аддитивного производства.

Ключевые слова: структурированным свет, координатно-измерительная машина, 3D-печать, 3D-сканирование, контроль качества, измерения.

Kushnir I.S.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
kushn1r_ivan@mail.ru

Adylina A.P.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
dmitr1eva@mail.ru

The effectiveness of structured-light 3D scanning for stand-alone and in-process measurement of 3D-printed parts

Abstract. This paper presents the results of a geometric analysis of a 3D-printed part measured using a contact probe on a CMM and a structured-light 3D scanner, along with an error analysis that includes a statistical comparison of the measured geometric deviations. This analysis is then used to determine whether structured-light 3D scanners are sufficiently reliable for conducting geometric dimensioning and tolerancing analysis for specific features. The paper also presents results from in-process 3D scanning and compares them with ex-process 3D scanning results to assess the suitability of in-process 3D scanning for comprehensive analysis of geometric deviations and features. Furthermore, the study evaluates the influence of scanning resolution, surface reflectivity, and part complexity on measurement repeatability. The comparative assessment highlights potential systematic errors inherent to optical methods and quantifies the level of agreement between contact and non-contact techniques. The findings support a methodology for integrating structured-light scanning into quality assurance workflows, particularly for intermediate inspection stages, thereby reducing post-process inspection bottlenecks and enabling faster feedback loops for additive manufacturing process optimization.

Keywords: structured light, coordinate measuring machine, 3D printing, 3D scanning, quality control, measurement.

Аддитивное производство, или 3D-печать, произвело революцию в изготовлении сложных деталей различной формы во всех основных отраслях промышленности [1]. Несмотря на многочисленные преимущества, такие как ускоренное прототипирование, сокращение отходов материала и расширение свободы проектирования, у аддитивного производства есть и свои уникальные проблемы, связанные с контролем качества [2]. Традиционные методы оценки точности изготовленных деталей, например координатно-измерительные машины (КИМ), отнимают много времени и стоят дорого, что снижает эффективность быстрого прототипирования или мелкосерийного производства. В связи с этим КИМ могут оказаться непригодными для оперативного анализа геометрии детали, напечатанной на 3D-принтере, особенно если деталь имеет сложные формы и элементы. Трёхмерное сканирование со структурированной подсветкой – это перспективная альтернатива для измерения напечатанных деталей, которая даёт более быстрые результаты по сравнению с традиционными методами [3]. В процессе такого сканирования на поверхность объекта проецируется структурированный световой рисунок, а две камеры фиксируют искажение этого рисунка с учётом

откалиброванного расстояния и угла между ними. Разница между полученными изображениями используется для восстановления геометрии объекта [4]. Результатом 3D-сканирования становится неупорядоченное облако точек поверхности измеренной детали, которое затем можно использовать для геометрического контроля. В отсутствие общепризнанной стандартной процедуры для сравнения различных технологий ряд исследователей разработали свои методы и артефакты для оценки метрологических характеристик сканирования со структурированным светом [5, 6, 7]. Кроме того, производители 3D-сканеров тоже создают собственные артефакты для верификации, с помощью которых конечный пользователь может проверить качество своего оборудования. Результаты такого контроля на основе сканирования можно также использовать для компенсации геометрии деталей с целью повышения их точности [8]. Более того, можно оптимизировать процесс контроля качества с точки зрения скорости ещё больше, если встроить измерительные датчики непосредственно в процесс 3D-печати [9, 10].

В этой статье мы представляем сравнение измерений детали из полимолочной кислоты (PLA), напечатанной на 3D-принтере, с помощью КИМ и 3D-сканера со структурированным светом. Также мы приводим результаты измерения, выполненного с помощью 3D-сканирования в процессе производства, и оцениваем изменение измерений на разных слоях печати. Данное исследование изучает метрологические характеристики 3D-сканирования со структурированным светом применительно к геометрическому контролю деталей, изготовленных на 3D-принтере. Сравнивая результаты сканирования в процессе производства, автономного сканирования и измерений на КИМ, мы стремимся дать представление о точности и надёжности автономного и внутрипроцессного 3D-сканирования со структурированным светом как инструмента контроля качества для аддитивного производства.

Деталь, использованная в этом исследовании, представляет собой пластину с 16 сферами, расположенными в шахматном порядке ромбовидным узором. На углу, который служит началом системы координат измерения, имеется элемент, помогающий определить ориентацию детали. Изображение использованной детали представлено на рисунке 1. Сферы были выбраны в качестве измеряемых элементов из-за их простой геометрии, которая удобна для численного анализа. Общий размер детали составляет 75 мм в длину и 75 мм в ширину. Пластина имеет толщину 5 мм, а радиус сфер равен 3,75 мм. Этот размер характерен для обычных деталей, печатаемых на настольном 3D-принтере.

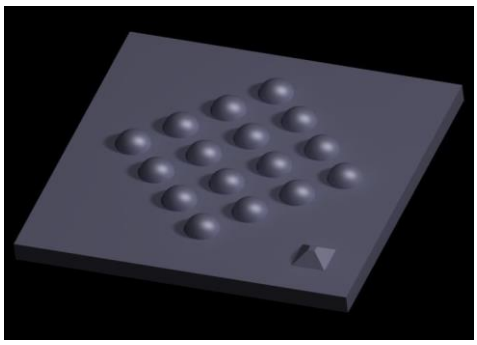


Рис. 1. 3D-модель шаровой пластины, использованная для анализа

Деталь печатается из белой PLA-нити на принтере Bambu Lab A1 Combомодифицированном для обеспечения возможности 3D-сканирования в процессе производства. Геометрия была нарезана в слайсере Cura с использованием стандартных быстрых параметров. Основные параметры этих настроек представлены в таблице 1. Точность, заявленная производителем принтера, составляет 0,1 мм по оси Z и 0,3 мм по осям X и Y [11].

Таблица 1

Параметры печати

Параметр	Значение
Температура печати	200 °C
Температура стола	60 °C
Высота слоя	0,2 мм
Плотность заполнения	20%
Скорость печати	60 мм/с

Одна и та же деталь измеряется с помощью КИМ, автономного 3D-сканирования и внутрипроцессного 3D-сканирования, при котором деталь сканируется каждые пять слоёв в процессе печати.

Измерение на КИМ

Деталь измеряется на координатно-измерительной машине (КИМ) после завершения печати и внутрипроцессного сканирования. Машина, использованная в этом исследовании, – GLOBAL Classic, производства Китая, оснащённая щупом TP7M. Длина стержня щупа составляет 20 мм, а радиус наконечника – 2 мм. Этот набор измерений даёт теоретически надёжное и точное измерение напечатанной детали. По этой причине он используется в качестве эталона для остальных измерений. Каждая сфера измеряется с использованием 51 точки, покрывающих всю поверхность каждой сферы, что в сумме составляет 816 измерительных точек.

Затем набор данных измерений обрабатывается с помощью скрипта на Python. Этот скрипт разделяет набор данных на 16 групп в зависимости от того, какой элемент они измеряют, и для каждой группы выполняет аппроксимацию сферы. Чтобы устранить любые ошибки совмещения, связанные с

тем, что начало координат измеряется КИМ на самой детали, применяется дополнительное преобразование совмещения с помощью анализа другого автора [12] с использованием центров аппроксимированных сфер и номинальных центров сфер из CAD-модели.

Автономное 3D-сканирование

Затем напечатанная деталь сканируется с использованием оптического 3D-сканера со структурированным светом. В этом исследовании используется RangeVision Prime производства РФ, с программным обеспечением для сбора данных RV3D Studio. Деталь жёстко закрепляется на ручном поворотном столике со сканерными маркерами, которые легко обнаруживаются 3D-сканером. Деталь поворачивается и сканируется для захвата геометрии со всех сторон. Благодаря маркерам, установленным на поворотном столике, программное обеспечение может точно сшивать несколько сканов для формирования полного облака точек всей детали. На рисунке 2 показана деталь на поворотном столике, сканируемая 3D-сканером RangeVision Prime.



Рис. 2. Настройка автономного 3D-сканирования

Результирующее облако точек состоит из приблизительно 525 000 точек с разрешением около 72,5 точек/мм². Затем данные были экспортированы в RV3D Studio для совмещения с номинальной геометрией. После этого скрипт выделяет точки, относящиеся к сферам, из остального облака точек и аппроксимирует сферы. Процесс сканирования детали во время её печати потребовал доработки 3D-принтера. Принтер Bambu Lab A1 Combo был модифицирован: под платформой построения установили плоский подшипник и шкив для обеспечения точного и плавного вращения. Также добавили шаговый двигатель и микроконтроллер Arduino Uno, для управления вращением в соответствии с последовательными командами, поступающими от управляющего компьютера. 3D-сканер, используемый для внутрипроцессного сканирования, сканер RangeVision Prime применяется для автономного 3D-сканирования. Каждые пять слоёв принтер получает команду на остановку, перемещает печатающую голову в положение на краю области сканирования, а

платформа построения перемещается в центр этой области. После этого сканируется платформа построения и всё, что на ней находится. На рисунке 3 показан модифицированный 3D-принтер в положении для сканирования. Результатом внутрипроцессного 3D-сканирования являются восемь облаков точек: от 312 000 точек для первого сканированного слоя до 416 000 точек для последнего. Каждый сканированный слой фиксирует внешнюю геометрию и видимое заполнение на этом слое. Программное обеспечение RV3D Studio фильтрует посторонние точки в облаке, выделяет точки, соответствующие каждой сфере, и вычисляет аппроксимированную сферу для каждой из них.

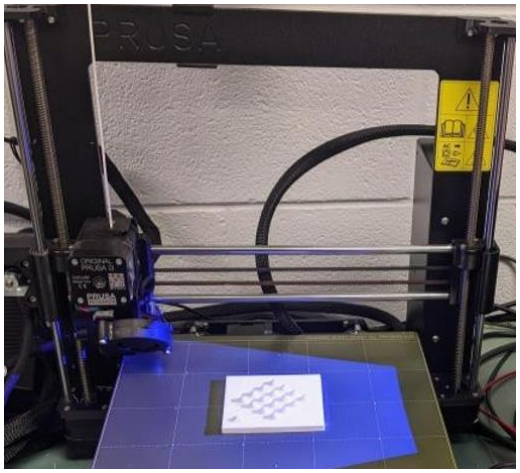


Рис. 3. Настройка 3D-сканирования в процессе работы в положении сканирования

Сравнение автономного 3D-сканирования с измерениями на КИМ

При анализе данных, полученных с помощью автономного 3D-сканирования, измерения на КИМ принимаются в качестве эталонной геометрии, поскольку они обеспечивают точное представление напечатанной детали. Это представление используется нами для характеристики погрешностей измерения, возникающих при работе 3D-сканера. Данный анализ сосредоточен на трёх видах погрешностей: погрешности измерения расстояний, погрешности измерения размеров и погрешности измерения формы (формула 1).

$$e_{uv} = |c_{скан}u - c_{скан}v| - |c_{КИМ}u - c_{КИМ}v| \quad (1)$$

где $c_{скан}u$ и $c_{скан}v$ – это центры аппроксимированных сфер u и v, полученные из данных сканирования, а $c_{КИМ}u$ и $c_{КИМ}v$ – центры аппроксимированных сфер uu и vv, полученные из данных КИМ. На рисунке 4 показаны погрешности измерений для каждого номинального расстояния. Средняя погрешность составляет 0,017 мм при стандартном отклонении 0,029 мм. Среднеквадратическое значение также было вычислено и равно 0,033 мм.

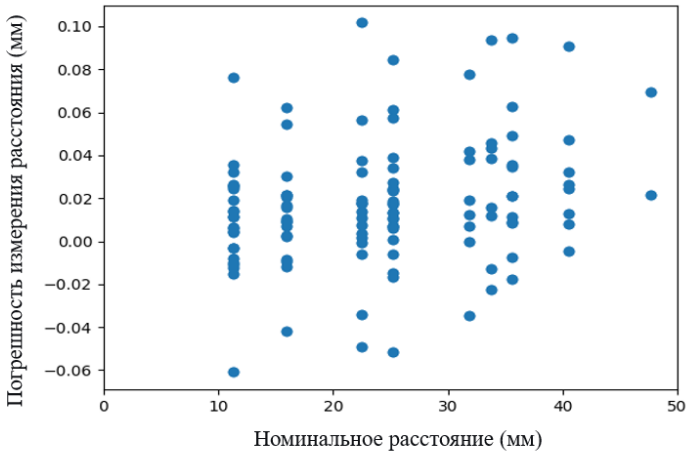


Рис. 4. Погрешность измерения расстояния

Размер определяется радиусом подогнанной сферы, а погрешность измерения размера – разностью между размером, измеренным с помощью 3D-сканера, и размером, измеренным с помощью координатно-измерительной машины. Погрешность измерения размера *ei* вычисляется с помощью уравнения 2.

$$e^{i}_{\text{размер}} = r^{i}_{\text{скан}} - r^{i}_{\text{ким}}, \quad (2)$$

где $r^{i}_{\text{скан}}$ – это радиус аппроксимированной сферы i в данных сканирования, а $r^{i}_{\text{ким}}$ – радиус аппроксимированной сферы i в данных КИМ. Средняя погрешность измерения размера составляет –0,095 мм при стандартном отклонении 0,030 мм. Максимальная вычисленная погрешность равна –0,159 мм, а минимальная погрешность составляет –0,053 мм.

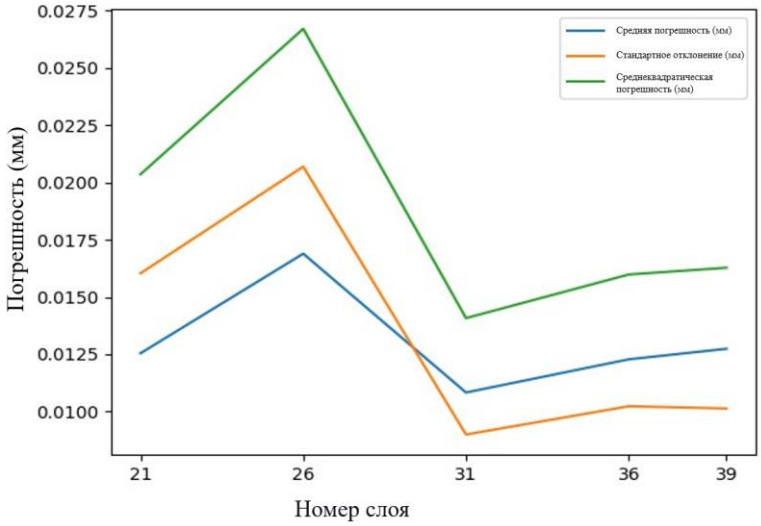


Рис. 5. Среднее значение, стандартное отклонение и среднеквадратичное значение ошибки измерения расстояния на отсканированных слоях

Из результатов сравнения автономного сканирования с измерениями на КИМ, представленных в сводном виде в таблице 2, ясно, что 3D-сканер способен точно фиксировать геометрическое качество детали, напечатанной на 3D-принтере. Однако для определения неопределённости измерений, получаемых с 3D-сканера, требуется дополнительная оценка. Особого внимания заслуживает тот факт, что средняя погрешность измерения размера оказалась выше остальных погрешностей. Это, вероятно, связано с ранее не обнаруженной систематической ошибкой в измерениях 3D-сканера.

Таблица 2

Сводка погрешностей измерений при сравнении 3D-сканера с КИМ

Тип измерения	Средняя погрешность (мм)	Стандартное отклонение погрешности (мм)	Среднеквадратическая погрешность (мм)
Расстояние	0,017	0,029	0,033
Размер	–0,095	0,030	0,100
Форма	0,010	0,008	0,099

С другой стороны, КИМ могут выполнять измерения только в заранее заданных точках на поверхности детали и легко могут пропустить дефекты из-за небольшого количества измерительных точек. На поверхности сферы присутствовал сгусток лишнего материала. Этот дефект был точно зафиксирован 3D-сканером, но не был обнаружен КИМ. Более того, если бы машина его обнаружила, это оказало бы более существенное влияние на качество измерения из-за относительно высокого веса каждой отдельной измерительной точки. При сравнении внутрипроцессного 3D-сканирования с автономным мы видим, что все погрешности на ранних слоях велики, а это означает, что данные сканирования нельзя считать надёжными для раннего прогнозирования итоговых геометрических отклонений. Тем не менее, с помощью статистического анализа можно было бы определить, будет ли соблюдён определённый допуск на сканируемом элементе уже на ранних этапах печати, что позволило бы сократить потери материала и времени. Однако для каждого типа элементов может потребоваться своя статистическая модель. Также можно было бы использовать модель машинного обучения для вычисления вероятности соблюдения допуска.

Кроме того, мы можем сравнить погрешности измерений последнего слоя внутрипроцессного 3D-сканирования с погрешностями автономного 3D-сканирования, поскольку в обоих случаях измеряется уже готовая деталь. Это сравнение показывает, что погрешности расстояния, размера и формы невелики по сравнению с более ранними слоями, что, скорее всего, обуслов-

лено термической деформацией. Это также может быть связано с погрешностью повторяемости 3D-сканера. Кроме того, деталь при автономном 3D-сканировании тщательно сканировалась, чтобы захватить все стороны всех сфер и оставить как можно меньше неохваченных участков. Для внутрипроцессного сканирования гарантировать это было бы невозможно. Данное обстоятельство могло снизить качество внутрипроцессных измерений.

Данное исследование показывает, что оптический сканер со структурированным светом способен точно оценивать геометрическую точность детали, напечатанной аддитивным способом, и что он обладает значительным преимуществом – возможностью захватывать всю поверхность геометрии без существенных затрат времени. При этом следует признать, что координатно-измерительные машины, хотя и обеспечивают более высокую точность измерений, которая позволяет использовать их в качестве эталонного метода, характеризуются существенно более низкой скоростью проведения измерений, что ограничивает их применимость в задачах операционного контроля качества при быстром прототипировании и серийном аддитивном производстве. Тем не менее, требуются дополнительные исследования для определения неопределённости измерений, получаемых с помощью данного оптического метода. Что касается внутрипроцессной реализации этого подхода, то автоматизация измерений до извлечения детали из принтера даёт те же преимущества, что и автономный режим, плюс возможность корректировки процесса печати путём компенсации. Несмотря на это, необходима более масштабная работа по улучшению качества получаемых данных для достижения результатов, аналогичных автономному сканированию. В заключение следует отметить, что необходимо провести дальнейшие изыскания для повышения эффективности внутрипроцессного контроля. Кроме того, с предложенной установкой можно интегрировать и другие методы оценки качества, чтобы разработать полноценный анализ геометрической точности печатной детали, а также других проверяемых свойств, таких как пористость, шероховатость поверхности или качество заполнения.

Список литературы

1. Khorasani M., Ghasemi A., Rolfe B., Gibson I. Additive manufacturing a powerful tool for the aerospace industry // Rapid Prototyping Journal. 2021. Vol. 28, No. 1. P. 87–100. DOI: 10.1108/RPJ-01-2021-0009.

2. Kim H., Lin Y., Tseng T.-L. B. A review on quality control in additive manufacturing // Rapid Prototyping Journal. 2018. Vol. 24, No. 3. P. 645–669. DOI: 10.1108/RPJ-03-2017-0048.

3. Wang R., Law A. C., Garcia D., Yang S., Kong Z. Development of structured light 3D-scanner with high spatial resolution and its applications for additive manufacturing quality assurance // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 117, No. 3. P. 845–862. DOI: 10.1007/s00170-021-07780-2.

4. Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pingi P., Scopigno R. A low cost 3D scanner based on structured light // Computer Graphics Forum. 2001. Vol. 20, No. 3. P. 299–308. DOI: 10.1111/1467-8659.00522.

5. Ghandali P., Khameneifar F., Mayer J.R.R. A pseudo-3D ball lattice artifact and method for evaluating the metrological performance of structured-light 3D scanners // Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 121. P. 87–95. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.03.020.

6. Bonin R., Khameneifar F., Mayer J. R. R. Evaluation of the metrological performance of a handheld 3D laser scanner using a pseudo-3D ball-lattice artifact // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 6. P. 2137. DOI: 10.3390/s21062137.

7. Cuesta E., Meana V., Álvarez B. J., Giganto S., Martínez-Pellitero S. Metrology Benchmarking of 3D Scanning Sensors Using a Ceramic GD&T-Based Artefact // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 22. P. 8596. DOI: 10.3390/s22228596.

8. Jadayel M., Khameneifar F. Improving geometric accuracy of 3D printed parts using 3D metrology feedback and mesh morphing // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2020. Vol. 4, No. 4. P. 112. DOI: 10.3390/jmmp4040112.

9. Sun W., Zhang Z., Ren W., Mazumder J., Jin J. (Judy). In Situ Monitoring of Optical Emission Spectra for Microscopic Pores in Metal Additive Manufacturing // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2022. Vol. 144, No. 1. P. 011006. DOI: 10.1115/1.4051532.

10. Qin J., Hu F., Liu Y., Witherell P., Wang C. C. L., Rosen D. W., Simpson T. W., Lu Y., Tang Q. Research and application of machine learning for additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 52. P. 102691. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102691.

11. Gower J. C. Generalized procrustes analysis // Psychometrika. 1975. Vol. 40, No. 1. P. 33–51. DOI: 10.1007/BF02291478.

СЕКЦИЯ 2
ИННОВАЦИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Смирнов В.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
voloda14022006@yandex.ru
Смирнов С.В.
к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
smirsj@yandex.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ современных аддитивных технологий получения изделий из алюминиевых сплавов с акцентом на методы, основанные на фрикционной обработке. Рассмотрены основные принципы классификации аддитивных процессов, включая селективное плавление (Powder Bed Fusion, PBF), прямое энергетическое осаждение (Directed Energy Deposition, DED), технологии с использованием порошков и проволоки, а также методы с последующим удалением связующего. Особое внимание уделено твердофазным аддитивным процессам, в частности методу послойного нанесения материала с помощью фрикционной обработки (AFSD), базирующемуся на принципах сварки трением с перемешиванием (FSW). Описаны ключевые технологические параметры AFSD, механизмы структурообразования, влияние процесса на микроструктуру и свойства алюминиевых сплавов. Показано, что твердофазные методы обеспечивают формирование мелкозернистой структуры, повышение плотности и механических характеристик заготовок без дефектов, характерных для технологий с полным плавлением. Обоснована перспективность развития аддитивных технологий на основе фрикционной обработки для получения высококачественных заготовок из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, алюминиевые сплавы, фрикционная обработка, AFSD, FSW, твердофазное аддитивное производство, микроструктура, механические свойства.

Smirnov V.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
voloda14022006@yandex.ru

mailto:anna1-2016@mail.ru
Smirnov S.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
smirsj@yandex.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

ADDITIVE TECHNOLOGY FOR OBTAINING BILLETS FROM ALUMINUM ALLOYS BY FRICTION PROCESSING

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of modern additive technologies for obtaining products from aluminum alloys with an emphasis on methods based on frictional machining. The basic principles of classification of additive processes are considered, including Powder Bed Fusion (PBF), Directed Energy Deposition (DED), technologies using powders and wires, as well as methods with subsequent debinder removal. Particular attention is paid to solid-phase additive processes, in particular, the method of layer-by-layer deposition of material using friction machining (AFSD), based on the principles of friction stir welding (FSW). The key technological parameters of AFSD, the mechanisms of structure formation, the effect of the process on the microstructure and properties of aluminum alloys are described. It is shown that solid-phase methods provide the formation of a fine-grained structure, an increase in the density and mechanical characteristics of workpieces without defects characteristic of technologies with full melting. The prospects for the development of additive technologies based on friction machining for obtaining high-quality billets from aluminum alloys are substantiated.

Keywords: additive manufacturing, aluminum alloys, friction machining, AFSD, FSW, solid-phase additive manufacturing, microstructure, mechanical properties.

Аддитивные технологии получения изделий из алюминиевых сплавов классифицируются по нескольким ключевым признакам, отражающим физико-химические принципы формирования изделий, используемое оборудование и особенности технологического процесса. В академической литературе и отраслевых стандартах принято выделять следующие основные группы.

По физическому принципу формирования слоя выделяют селективное плавление (Powder Bed Fusion, PBF) и прямое осаждение материала (Directed Energy Deposition, DED) [1]. Селективное плавление реализуется в процессах лазерное плавление (SLM), когда послойное плавление металлического порошка лазерным лучом, а также при электронно-лучевом плавлении (EBM) (аналогично SLM, но с использованием электронного пучка в вакууме).

Прямое осаждение материала осуществляется при лазерной наплавке (LMD, DMD), когда происходит подача металлического порошка или проволоки в зону воздействия лазерного луча. Аналогичный процесс реализуется при использовании электронного луча.

По типу используемого материала можно выделить технологию на основе порошков (сферических и несферических) различной дисперсности, а также при подаче алюминиевой проволоки в зону плавления.

По способу подачи и консолидации материала возможно нанесение материала тонким слоем, после чего происходит его локальное плавление (послойное формирование, Bed-based). Другим способом подачи материала является прямое осаждение (Jetting/Extrusion). В этом случае Материал подается непосредственно в точку формирования изделия (например, экструзия алюминиевой пасты или пасты с металлическим наполнителем).

Технологии с последующим удалением связующего (Binder Jetting). Формирование заготовки из смеси алюминиевого порошка и органического/неорганического связующего с последующим спеканием и удалением связующего.

Технологии с полной плавкой материала (SLM, EBM, LMD) – обеспечивают высокую плотность и механические свойства. Технологии с частичным плавлением или спеканием – применяются для получения пористых или композитных структур.Краткая классификация основных технологий представлена в таблице 1.

Таблица 1

Краткая классификация аддитивных технологий

Признак классификации	Основные технологии	Краткая характеристика
Физический принцип	PBF (SLM, EBM), DED (LMD, EBF3)	Плавление порошков/проволоки лазером/электронным пучком
Тип материала	Порошковые, проволочные	Использование порошков или проволоки из алюминиевых сплавов
Способ подачи	Bed-based, Directed	Послойное нанесение или прямое осаждение
Наличие связующего	С/без связующего	Binder Jetting, прямое плавление
Технологические особенности	Полная/частичная плавка	Плотные или пористые структуры

Такая классификация позволяет систематизировать подходы к аддитивному производству изделий из алюминиевых сплавов, оптимизировать выбор технологии в зависимости от требований к геометрии, свойствам и назначению конечного изделия.

Среди методов с прямой подачей материала в зону плавления особенно выделяется электронно-лучевая технология работы с проволокой – она обеспечивает наиболее высокое качество получаемого материала. Однако у этого подхода есть свои особенности: при электронно-лучевом изготовлении деталей формируется крупнокристаллическая структура. Дендриты в

такой структуре растут направленно – в сторону отвода тепла. Это свойство можно использовать с пользой, но есть и минус: итоговая прочность материала оказывается сопоставима с прочностью обычной литой заготовки.

Селективное лазерное плавление (СЛС) – один из самых популярных методов, используемых для алюминиевых сплавов. Технология получила широкое применение за счет возможности изготовления сложнопрофильных изделий по компьютерной модели практически из любых металлических порошков.

Процесс селективного лазерного плавления (SLM) начинается с нанесения на рабочую поверхность стола равномерного слоя металлического порошка заданной толщины – для этого используется ролик подачи. Затем лазерный или электронный луч, направление которого задаётся сканирующим зеркалом, расплавляет частицы порошка в тех зонах слоя, которые соответствуют текущему сечению 3D-модели. Это происходит несколько циклов, пока заготовка полностью не напечатается.

Ключевая технологическая особенность SLM заключается в том, что в ходе построения деталь остаётся погружённой в массив неспеченного порошка. Этот порошок выполняет функцию естественной поддерживающей структуры – он механически стабилизирует элементы детали с малой жёсткостью: тонкие стенки, перегородки, нависающие участки и т.д. Благодаря такому решению становится возможным изготавливать изделия со сложной геометрией без применения дополнительных опорных конструкций.

Синтез в слое порошка (ССП) – плавление в слое порошка. Процесс начинается с нанесения тонкого слоя порошка (толщина 20–100 мкм) на рабочую платформу в герметичной закрытой камере. Источником энергии служит лазер или электронный луч. Они выборочно сплавляют порошок по заданной траектории, формируя слой детали. После этого платформа опускается, наносится новый слой порошка, и процесс повторяется до завершения изделия. Не сплавленный порошок остается в камере как поддержка, устраняя необходимость формирования дополнительных структур. [2]

Directed Energy Deposition (DED) (прямое энергетическое осаждение) позволяет использовать алюминий в виде порошка или проволоки, плавя материал с помощью лазера, электронного луча или плазменной дуги и осаждая его слой за слоем. Однако при работе с алюминием необходимо учитывать его высокую теплопроводность и относительно низкую температуру плавления по сравнению с оксидами, что может влиять на стабильность процесса.

Cold Metal Fusion (CMF, холодное металлическое сплавление) – технология аддитивного производства, которая сочетает принципы селективного лазерного спекания (SLS) с принципами порошковой металлургии. Она позволяет создавать металлические детали путём послойного нанесения порошка, состоящего из металлических частиц, покрытых полимерным связующим. После печати полимер удаляется, а металлические частицы спекаются в печи, образуя плотное металлическое изделие.

Фрикционная обработка (ФО) – это процесс модификации поверхности материала за счёт интенсивного пластического деформирования при трении. В настоящее время активно развиваются два метода фрикционной обработки алюминиевых сплавов.

Первый вид фрикционной обработки – фрикционная перемешивающая обработка (FSP). Это твердотельный одно- или многостадийный метод, который обеспечивает измельчение зерна, упрочнение и структурную однородность без изменения формы и размера обрабатываемого материала. При FSP вращающийся инструмент с штифтом и буртиком перемещается в заготовке, вызывая локальный нагрев из-за трения. Это приводит к интенсивной пластической деформации и формированию мелкозернистой структуры. Метод особенно подходит для обработки цветных металлов с низкой температурой плавления, таких как алюминий.

Второй метод – фрикционно-электрическая обработка (ФЭО). Этот метод является комбинация фрикционной и электромеханической обработок. Основным технологическим фактором является температура, выделившаяся в процессе трения, а дополнительным источником тепла – теплота, выделившаяся при прохождении электрического тока через локальный объём фрикционно-термического воздействия. Например, при обработке поверхностного слоя образцов из алюминиевых сплавов с армированием частицами оксида алюминия удалось увеличить твёрдость материала примерно на 30–40%, толщину упрочнённого слоя – в 3–5 раз, а также повысить износостойкость поверхностного слоя.

Интенсивная пластическая деформация уменьшает размер зёрен, что улучшает прочность и усталостную устойчивость материала. В процессе FSP происходит динамическая рекристаллизация, что приводит к образованию ультрамелкозернистой структуры. Средний размер зерна в зоне перемешивания (ЗП) часто уменьшается до 5–10 мкм и менее. Это способствует повышению прочности и твёрдости материала. [3, 4] Фрикционная обработка помогает устранить дефекты, возникшие на ранних производственных процессах. Интенсивная пластическая деформация и перемешивание материала способствуют уплотнению структуры и гомогенизации состава. [5]

Основными параметрами, которые напрямую влияют на результат являются: скорость вращения индентора, скорость перемещения индентора вдоль поверхности, осевая сила (нагрузка на индентор), соотношение скорости вращения и перемещения. [6]

При обработке термоупрочняемых алюминиевых сплавов процесс структурообразования определяется конкурирующими процессами деформационно-индуцированного растворения частиц вторичных фаз и их последующего выпадения из пересыщенного твёрдого раствора при охлаждении материала. [7]

Аддитивные технологии, базирующиеся на принципах фрикционной обработки, представляют собой перспективное направление в области послойного формирования изделий из алюминиевых сплавов. В отличие от

традиционных методов, основанных на плавлении материала с помощью внешних источников энергии (лазер, электронный луч), данные процессы реализуют соединение и консолидацию материала за счёт тепла, генерируемого непосредственно в зоне контакта при интенсивном трении.

Ключевым механизмом является фрикционный нагрев, возникающий в результате относительного движения инструмента и заготовки. В процессе трения происходит локальное повышение температуры, достаточное для пластификации поверхностного слоя материала без его полного расплавления. Это обеспечивает возможность формирования новых слоёв и их прочного соединения с предыдущими за счёт диффузионных и механических процессов.

Твёрдофазный аддитивный процесс, при котором материал (пруток или проволока) пластически деформируется вращающимся инструментом и послойно осаждается без плавления. Благодаря твердотельной природе процесса AFSD позволяет не просто соединять материала, но и улучшать свойства за счет измельчения зерна. Процесс основан на принципах Friction Stir Welding (FSW) – Сварки трением с перемешиванием СТП (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема твердофазного аддитивного процесса

Основными технологическим параметрами процесса AFSD являются: скорость вращения инструмента, скорость подачи материала, скорость перемещения инструмента, осевое усилие (усилие прижима), крутящий момент, температура процесса (тепловложения), диаметр и геометрия инструмента, высота слоя и температура подложки / предварительный подогрев (рис. 2).

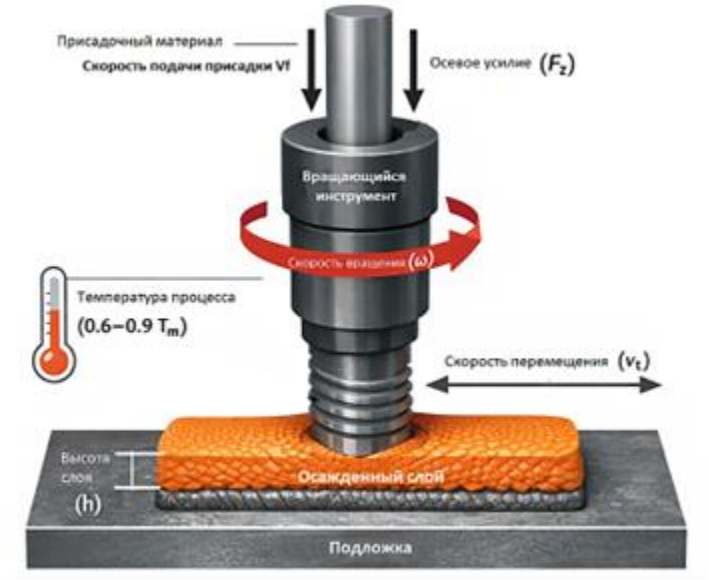


Рис. 2. Основные технологические параметры процесса AFSD

В таблице 2 приведены ориентировочные значения основных параметров процесса AFSD при выращивании заготовок из алюминиевых сплавов.

Таблица 2

Ориентировочные значения параметров AFSD

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Типичный диапазон
Скорость вращения инструмента	ω	об/мин	200–1200
Скорость подачи присадки	Vf	мм/мин	50–500
Скорость перемещения	Vt	мм/мин	50–300
Осевое усилие	Fz	кН	5–30
Высота слоя	h	мм	0,5–2
Температура процесса	Tm	°C	(0,6–0,9)$T_{пл}$

Основное отличие – присадочный материал подается по центру вращающегося инструмента в виде прутка или порошка, а затем втирается в подложку или предыдущий слой (рис. 3).

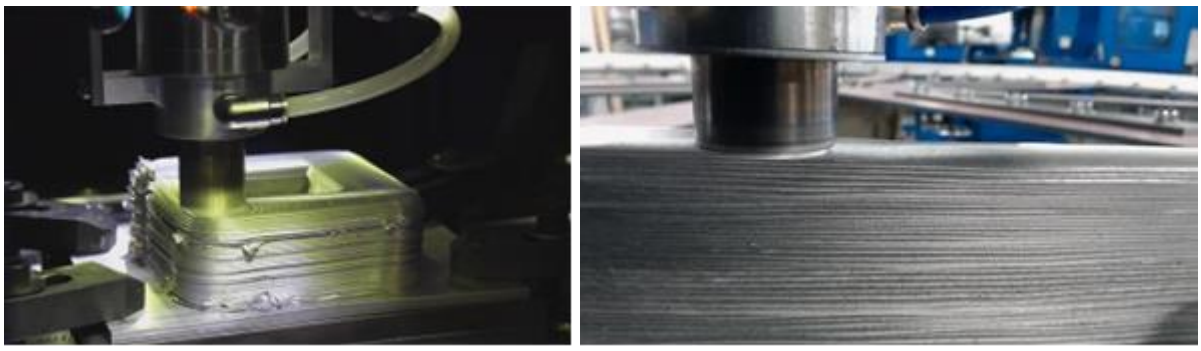


Рис. 3. Процесс AFSD алюминиевого сплава

Для образцов, изготовленных методом AFSD, особенности течения материала очень сложны из-за наличия многослойных нахлесточных соединений, подверженных различным термическим циклам. В результате сохраняются некоторые различия в микроструктуре в разных областях и на границах между слоями. Как правило, в центральной зоне перемешивания отсутствуют дефекты.

Однако, из-за высоких пиковых температур, скорости деформации и термического цикла сварки, технология AFSD приводит к растворению, укрупнению зерен и динамической рекристаллизации.

Метод AFSD позволяет наносить материал без плавления, обеспечивает беспроблемное нанесение материалов, которые трудно изготовить в 3D-формате с помощью методов термопластического производства.

В материалах, выращенных с использованием AFSD, в осажденных структурах наблюдаются более мелкие и равноосные зерна из-за повышения температуры рекристаллизации.

Список литературы

1. Кубанова, А. Н. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий / А. Н. Кубанова, А. Н. Сергеев, Н. М. Добровольский, А. Е. Гвоздев, П. Н. Медведев, Д. В. Малий // Чебышевский сборник. – 2019. – Т. 20, вып. 3. – С. 453–477. – DOI: 10, 22405/2226-8383-2019-20-3-453-477.

2. https://fian.smr.ru/AM/powder_bed_fusion.html : Zongwen Fu & Carolin Körner (2022) Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion, European Journal of Materials, 2:1, 54-116, DOI: 10, 1080/26889277.2022.2040342

3. Martin, J. H. 3D printing of high-strength aluminium alloys / J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley [et al.] // Nature. – 2017. – Vol. 549, № 7672. – P. 365–369. – DOI: 10, 1038/nature23894.

4. Елисеев А.А., Калашникова Т.А., Филиппов А.В., Калашников К.Н., Белобородов В.А., Чумаевский А.В. Механические свойства сплава амг5 в ультрамелкозернистом состоянии, полученного перемешивающей фрикционной обработкой листового проката различной толщины // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 278–283; URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41083 (дата обращения: 02.05.2026).

5. Княжев Е. О., Николаева А. В., Чумаевский А. В. и др. Iron-Added Aluminum Matrix Composites Prepared by Friction Stir Processing: Structure, Mechanical and Tribological Properties // Metallography, Microstructure, and Analysis. – 2024. – Т. 13, № 3. – С. 376–399.

6. On effect of FSP on microstructural and mechanical characteristics of A390 hypereutectic Al–Si alloy / M. Zhang, L. Wang, X. Li [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2020, – Vol. 285. – P. 116–125. – DOI: 10, 1016/j.jmatprotec.2020, 116.

7. Чумаевский А. В. Особенности формирования структуры в алюминиевых, медных, титановых сплавах и композиционных материалах на их основе при фрикционной перемешивающей обработке и сварке: дис. … д-ра техн. наук / Чумаевский А. В. – Томск, 2022. – 38 с.

Чуликова Ж.Е.
заведующий кафедрой техники и технологии промышленного
и гражданстkого строительства
Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета
Россия, Коломна
matriza_janna@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет»
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

АКСЕЛЕРАТОР ДЕФЕКТОВ СПЛАВА 18–8

Аннотация. Сплавы типа 18-8 относятся к классу аустенитных сталей марок 08Х18Н10Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т и др. Термическое старение таких сталей вызывает выделение избыточных фаз из пересыщенного твердого раствора, что сопровождается образованием карбидов Me_7C_3, $Me_{23}C_6$, Me_6C и благоприятствует образованию σ−фазы и интерметаллидов переменного состава. Присутствие таких фаз ухудшает пластические свойства металла.

Ключевые слова: аустенитная сталь 08Х18Н10Т; специальные карбиды; сигма-фаза (σ), интерметаллид, ферротитанид, фаза Лавеса.

Chulikova Zh.E.
Head of the Department of Engineering and Technology
of Industrial and Civil Engineering
Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University
Russia, Kolomna,
matriza_janna@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

ACCELERATOR FOR ALLOY DEFECTS 18-8

Abstract. Alloys of type 18-8 belong to the class of austenitic steels 08X18H10T, 12X18H9T, 12X18H10T, etc. Thermal aging of such steels causes the release of excess phases from a supersaturated solid solution, which is accompanied by the formation of carbides Me_7C_3, $Me_{23}C_6$, Me_6C and favors the formation of the σ-phase and intermetallic compounds of variable composition. The presence of such phases worsens the plastic properties of the metal.

Keywords: austenitic steel 08X18H10T; special carbides; sigma phase (σ), intermetallic compound, ferrotitanide, Laves phase.

Сплавы типа 18-8 (18–20% хрома, 8–12% никеля) относятся к классу коррозионностойких жаропрочных аустенитных сталей марок 08Х18Н10Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, международный аналог AISI 321и др. Широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе при изготовлении «горячих» деталей. Сплавы с высоким содержанием

хрома ведут себя, как благородные металлы, обладая положительным потенциалом, не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде и ряде кислот. Они сочетают достаточную прочность с очень высокой пластичность и вязкостью в широком диапазоне температур, не упрочняются при закалке, хорошо свариваются, теплостойки, жаропрочны, маломагнитны или немагнитны.

Механические свойства различных марок аустенитных сталей в закаленном состояние мало различаются между собой, если нет больших отклонений по химическому составу (рис. 1).

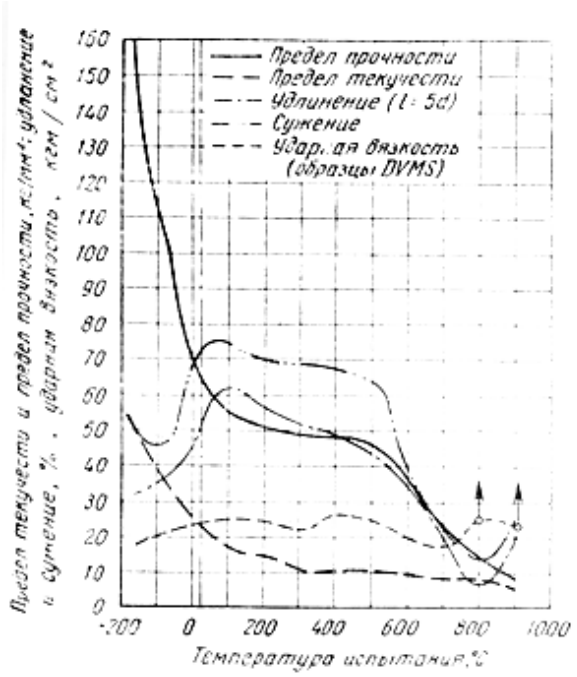


Рис. 1. Механические свойства стали: 0,11%C, 0,59%Si, 0,49%Mn,18,1%Cr, 9,0%Ni при различных температурах [2]

Хром является основным легирующим элементом аустенитных сталей, в соединении с никелем усиливает прочность металла. Никель предохраняет сплавы от межкристаллитной коррозии при работе в сложных температурных условиях и не образует карбидов. Титан повышает жаропрочность, сдерживает образование хрупких карбидов, что особенно важно при сварке. Низкое содержание углерода тоже улучшает свариваемость сталей.

Таблица

Влияние примесей на свойства аустенитных сталей

Массовая доля C,%	Массовая доля Cr,%	Массовая доля Ni,%	Массовая доля Ti,%	Предел прочности $\sigma_в$, МПа
0,03	17–19	11,5–13	≤ 0,005	740
0,06	17–19	9–11	0	490
0,08	17–19	17–19	≤ 0,7	510
0,12	17–19	8–9,5	≤0,8	540
0,12	17–19	9–11	≤0,8	510

Легирующие элементы преимущественно растворяются в аустените или образуют специальные карбиды. При этом первичные карбиды типа MeC стали 08XI8HI0T представляют собой карбид титана TiC, размеры которого не слишком велики, чтобы оказывать существенное влияние на упрочнение аустенитной матрицы. Однако первичные карбиды MeC могут участвовать в важных реакциях распада, ведущих к образованию карбидов с более низким содержанием углерода типа Me_7C_3, $Me_{23}C_6$, Me_6C.

Из диаграммы состояния (рис. 2) видно, что состав сталей типа 18-8 лежит вблизи гетерогенной λ + γ области; поэтому при наличии в твердом растворе других ферритообразующих элементов (кремний, молибден, титан) после закалки аустенит оказывается метастабильным и при охлаждении до низких температур претерпевает мартенситное превращение (рис. 3).

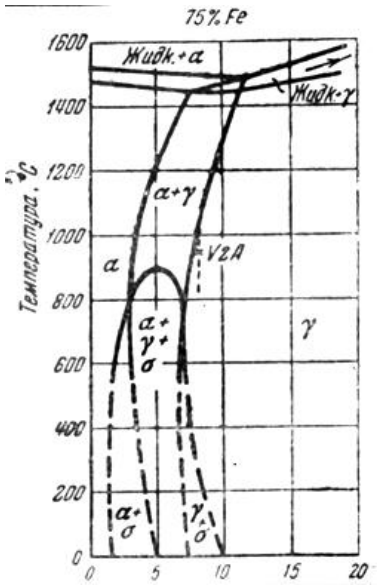


Рис. 2. Диаграмма состояния железо–хром–никель при 75% железа по массе [3]

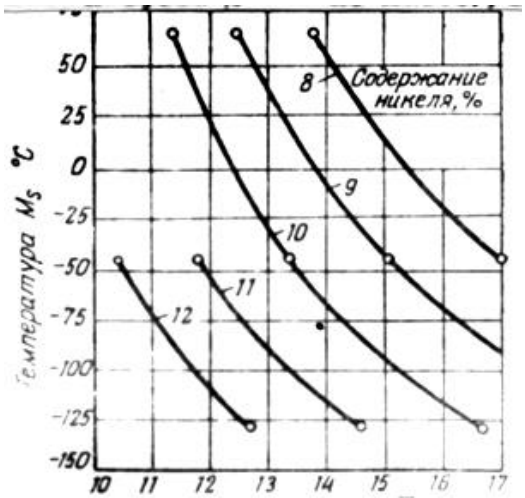


Рис. 3. Влияние хрома на температуру M_s нержавеющей хромоникелевой стали с 8…12% никеля и поправкой на 1,33% марганца. Цифры у кривых указывают на содержание никеля в% по массе [2]

Карбид Me_6C образуется при 815…980 °С и относительно термостабилен при температурах не выше 750 °С.

Карбиды MeC имеют простую кристаллическую структуру, в отличие от Me_7C_3, $Me_{23}C_6$, Me_6C, при нагреве легко внедряются в аустенит. Все карбидные фазы обладают высокой температурой плавления и высокой твердостью [1]. Фазы внедрения в этом отношении превосходят остальные карбиды.

В процессе распада твердого раствора гетерогенного аустенита образуются карбиды и интерметаллиды следующим образом:

$$TiC \rightarrow Me_7C_3 \rightarrow Me_{23}C_6 \rightarrow \sigma\text{-фаза}$$

Из [6] известно, что длительная выдержка при рабочих температурах 500–700 ºС ведет к небольшому охрупчиванию стали за счет некоторого выделения избыточных фаз по границам зерен и образованию σ−фазы, представляющей собой интерметаллид типа FeCr.

Сигма-фаза (σ) – электронное соединение с широкой областью гомогенности. Структура σ–фазы во всех двойных, тройных системах промышленных сталей и сплавах сходна и кристаллизуются в тетрагональные сингонии. Элементарная ячейка с параметрами а = 8,800 Å, с = 4,544 Å содержит 5 неэквивалентных атомных позиций (всего 30 атомов). Расстояние между атомными слоями σ–фазы равно 2,28 Å, что значительно меньше, чем в решетках твердых растворов λ−Fe и γ−Fe. Поэтому при образовании σ–фазы электронное состояние компонентов сильно меняется, что сопровождается и объемными изменениями, т.е. приводит к суммарному уменьшению объема сплава при выделении σ−фазы.

В сталях, которые содержат в структуре феррит и аустенит, σ−фаза может образоваться как из λ− так и из γ−твердых растворов, поскольку состав её близок к границе σ + λ (рис. 4).

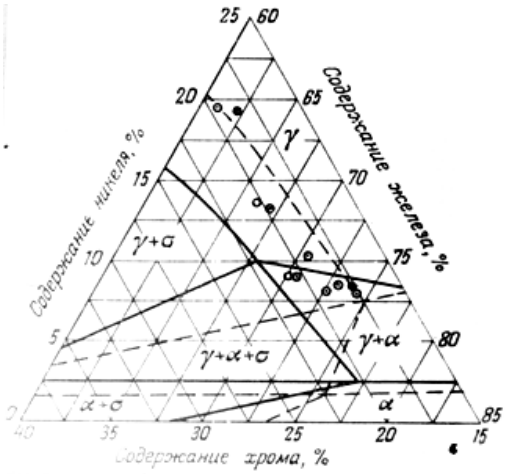


Рис. 4. Изотермический разрез диаграммы состояния тройной системы Fe–Cr–Ni при 660 ºС [2]

Когда феррит не полностью переходит в σ−фазу, оставшийся обедненный хромом феррит превращается в аустенит, который отличается по химическому составу от первоначально имевшегося аустенита (иногда обозначается, как γ'−фаза). Обычно σ−фаза обнаруживается с помощью металлографического (рис. 5) и рентгеноструктурного анализов.

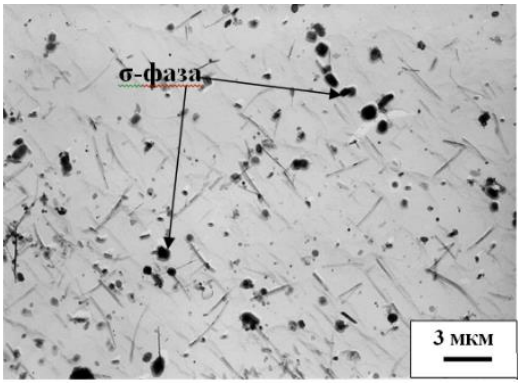


Рис. 5. Распределение карбидов в тонкой структуре стали 08Х18Н10Т в состоянии горячей прокатки (х3400) после выдержки при 650 °С в течение 5000 ч

Многочисленными исследованиями [4–6] показано вредное влияние σ-фазы на эксплуатационные характеристики хромоникелевых аустенитных сталей из-за высокой твердости (порядка 11000 МПа) и значительного обеднения матрицы твердого раствора хромом. Присутствие σ-фазы резко снижает ползучесть и длительную прочность, так как большие количества тугоплавких элементов-упрочнителей выводятся из матрицы сплава. Так же, σ-фаза может вызвать дефекты в сварных швах, например из стали 08Х18Н10Т, длительно работающих с перегревами. Хрупкие разрушения при повышенных температурах происходят предпочтительно вдоль границ σ-фазы, которые служат источниками зарождения и распространения трещин.

Авторами статьи проведен микроструктурный анализ стали 08Х18Н10Т и состава выпадающих фаз на электронно-зондовом микроанализаторе ЕРМА-1720 путем высокоточного рентгеноспектрального метода исследования [8]. Режим сканирования выбран непрерывным в интервале 30–60 мкм. Результаты регистрировались на сканограммах, содержащие профили рентгеновских интенсивностей концентраций легирующих элементов по зерну и при пересечении зондом границ зерен.

Рентгеноспектральный микроанализ показал различия в поведении основных легирующих элементов: хрома, титана и никеля в окрестностях зерен аустенита. В металле в состоянии поставки концентрационных изменений по хрому в приграничных зонах не наблюдается (рис. 6), а «всплески» концентрации титана имеют место на частицах карбонитридов в теле зерна.

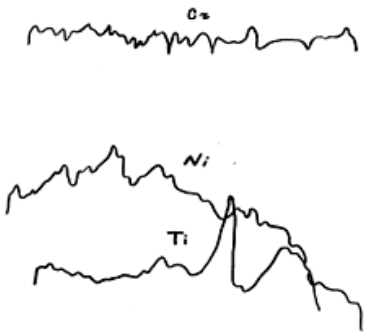


Рис. 6. Сканограмма концентрации легирующих элементов в микроструктуре стали 08Х18Н10Т в состоянии поставки

После аустенизации со стабилизирующим отжигом так же не наблюдается концентрационных изменений по хрому в приграничных зонах (рис. 7), а более частые «всплески» концентрации титана соответствуют большему количеству карбонитридов.

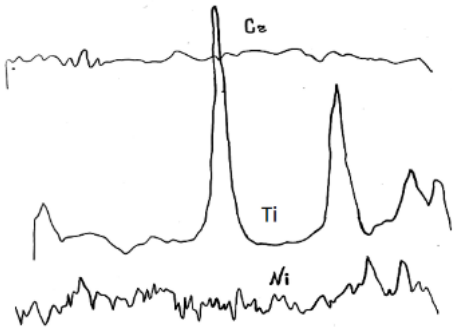


Рис. 7. Сканограмма концентрации легирующих элементов в микроструктуре стали 08Х18Н10Т после аустенизации

После термического старения до 650°С в течение 5000 часов наблюдается резкое снижение концентрации хрома (рис. 8). В данном случае, выбранные режимы старения близки к рабочим режимам эксплуатации «горячих» деталей.

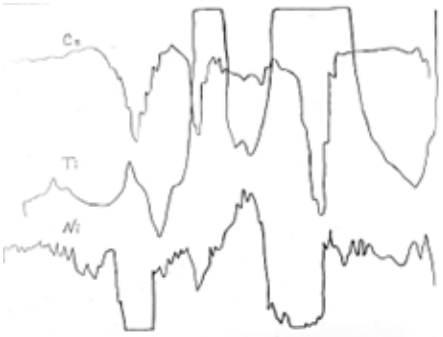


Рис. 8. Сканограмма концентрации легирующих элементов в микроструктуре стали 08Х18Н10Т после старения 650 ℃ в течение 5000 ч

На межфазных границах обнаруживается присутствие неизвестной интерметаллической фазы, близкой по форме и расположению (по границам зёрен) к σ-фазе, но отличающейся от нее по составу (γ-фаза, либо $Me_{23}C_6$).

Для σ-фазы характерно повышенное содержание хрома, а для неизвестной фазы наблюдается резкое снижение концентрации хрома (рис. 8) при одновременном увеличении количества титана. Зарождение такой фазы, по-видимому, связано с тем, что в аустенитных сталях типа 08Х18Н10Т титан не расходуется полностью на связывание углерода в первичные карбиды. Поэтому часть титана остается растворенной в аустените и в интервале температур 550–700°С при выпадении карбидов $Me_{23}C_6$ в σ-фазу образует, предположительно, ферротитанид. Кристаллографические параметры этой фазы установить не удалось.

Из практики известно, в жаропрочных сплавах встречаются упрочняющие интерметалидные фазы переменного состава на базе химических соединений твердых растворов. Их образование возможно только при термодинамическом равновесии бинарных циклов. При этом, многокомпонентные соединения отличаются малой, а во многих случаях отрицательной величиной энтропии, что позволяет использовать величину энтальпии вместо энергии Гиббса для оценки самопроизвольных процессов термодинамических систем $A_2B \rightarrow AB \rightarrow AB_2 \rightarrow AB_3 \rightarrow \ldots$.

Энтальпия образования возможных фаз в стали 08Х18Н10Т приведена на рисунке 9 [9]:

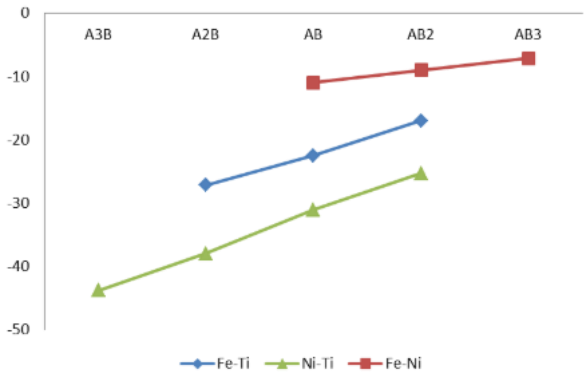


Рис. 9. Зависимость энтальпии образования интерметаллических фаз Лавеса

Для фаз типа A_2B значение энтальпии ниже, чем для фаз AB и AB_2. Следовательно, образование интерметаллических фаз переменного состава $(Fe, Ni)_2Ti$ наиболее вероятно, так как повышает термодинамическую стабильность системы.

По данным [10] ферротитанид Fe_2Ti образуется в интервале температур 600–900°С. Титан является «инициатором» образования этой гексагональной плотноупакованной кристаллической структуры в хромоникелевой матрице с координационным числом 12. Рентгеновская плотность ρ=6,91 г/см^3. Параметры кристаллической решетки a = b = 4,785 Å, c = 7,799 Å. Относится к фазам Франка-Каспера и Фриауфа-Лавеса. Фазовый прототип $MgZn_2$ [7,11–12].

Никель считается сильным стабилизатором бинарных фаз в многокомпонентных системах [10]. Хром способствует образованию фаз только в

присутствии титана, так как энтальпия образования фазы Cr_2Ti имеет самое низкое значение среди фаз переходных металлов.

Ферротитаниды, как и интерметаллиды фазы σ – FeCr, являются побочными и нежелательными продуктами в сплавах 18–8. Они обладают свойствами, характерными для солей: высокой температурой плавления и химической стойкостью, низкой диффузионной подвижность компонентов, пониженной электрической проводимостью, наличием на диаграммах состояния узких областей гомогенности. Отличаются низкой пластичностью и сообщают повышенную хрупкость сплавам при низких температурах.

Пример этому, хрупкое разрушение образца [8] термообработанного по режиму: аустенизация + старение 550°С в течение 2000 часов. Испытания металла проводились при температуре нагрева Т = 600°С при напряжениях σ = 250 МПа в течение τ = 3175 часов. Сканограмма образца представлена на рисунке 10.

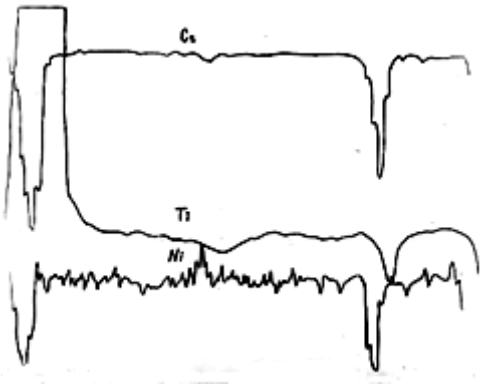


Рис. 10. Сканограмма концентрации легирующих элементов на границе раздела σ-фаза с аустенитной матрицей

При сканировании межзеренной области в зоне разрушения исследуемого образца наблюдаются синхронные минимумы концентрационных кривых Cr, Ti, Ni. Это свидетельствует о нарушении сплошности границы раздела между зерном и включением, вследствие длительного разрушения с низкой пластичностью. Сканирование по частице при этом указывает на рост концентрации титана при резком снижении концентрации хрома. То есть, низкая пластичность связана с выпадением промежуточной интерметаллической фазы.

При дальнейшем повышении температуры до 650°С наблюдается замедление падения пластичности. Нами зафиксировано незначительное повышение длительной прочности. Как и все интерметаллиды, ферротитанид упрочняет стальную матрицу, повышает ее твердость и химическую стойкость.

При увеличении температуры испытаний до 750°С охрупчивание металла снижается. Это связано со структурно-фазовыми превращениями стали 08Х18Н10Т и возможным растворением избыточных фаз.

Для предотвращения зернограничного выделения интерметаллидов переменного состава при эксплуатационных нагревах аустенитных сталей можно рекомендовать:

1. Недопущение длительной работы материала за пределами рабочих температур.
2. Лимитирование срока эксплуатации «горячих» деталей из сплава типа 18-8.
3. Пересмотр регламента технического обслуживания и ремонта энергетических установок.

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Эксплуатационное старение стали типа 18-8 сопровождается образованием карбидов Me_7C_3, $Me_{23}C_6$, Me_6C, которые при нагреве легко внедряются в аустенит. При этом они обладают высокой температурой плавления и высокой твердостью.
2. Длительная эксплуатация аустенитной стали (08XI8HI0T) в условиях теплоэнергетики ведет к охрупчиванию аустенитной стали за счет образования вдоль границ избыточных σ−фаз, которые служат источниками зарождения и распространения трещин.
3. Высокотемпературное охрупчивание при 550–900 °С является следствием низкой когерентной связи частиц промежуточной интерметаллидной фазы переменного состава, зарождающейся на границах раздела σ-фаза с обедненной хромом околограничной зоной аустенитной матрицы.
4. Ферротитаниды, как и интерметаллиды σ – фазы, являются побочными и нежелательными продуктами в сплавах 18-8. Они отличаются высокой твердостью, низкой пластичностью и сообщают повышенную хрупкость сплавам.
5. Для предотвращения высокотемпературной повреждаемости аустенитной стали необходимо разработать надежный метод предварительного прогноза их работоспособности в зависимости от эксплуатационных условий.
6. Для продления срока эксплуатации нефтеперерабатывающих энергетических установок требуется актуализировать регламент технического обслуживания и ремонта производственно-технологического оборудования.

Список литературы

1. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – 6-ое издание, переработанное и дополненное. – Москва : Металлургия, 1986. – 272 с.
2. Гудремон Э. Специальные стали. − М.: ГНТИ, т.1, 1959. − 822 с.
3. Коломбье З., Гохман И. Нержавеющие и жаропрочные стали. − М.:, Металлургиздат, 1958. − 101 с.
4. Приданцев М.В., Ланская К.А. Стали для котлостроения. − М.:, Металлургиздат, 1959. − 161 с.
5. Меськин В.С. Основы легирования стали. − М.: ГНТИ, 1959. − 322с.
6. Bergman G., Shomaker D. Acta Cryst. − 1954, V.7. − P.857–865.
7. Bruckner W., Kleinstuck K., G.E.R. Schulze, Phys. Status Solidi 23, 475 (1967).

8. Effect of long-term exposures at elevated temperature on evolution of 08KH18N10T steel structure Chulikova Zh.E., Ovchinnikov V.V. Inorganic Materials: Applied Research. 2024. Т. 15. № 4. С. 1138–1146.

9. Enthalpy of formation of intermetallic phases from Fe-Ni-Ti system. Comparative studies Gasior W., Debski A. Archives of Metallurgy and Materials. 2012. Volume 57 (4). P.:1095–1104.

10. Тарасенко Л.В. Структура, состав интерметаллидных фаз и свойства стали Х11Н10М2Т / Л.В. Тарасенко, Н.В. Звигинцев, В.И. Титов, З.М. Рулина, М.С. Хадыев. Текст: электронный // VIAM.RU : [сайт]. – 2024. – URL: https://viam.ru/sites/default/files/scipub/1984/1984-199125.pdf (дата обращения: 01.10, 2025).

11. Тарасенко Л.В. Образование фазы Лавеса в жаропрочной аустенитной стали при длительных нагревах / Л.В. Тарасенко, А.Б. Шалькевич. Текст: электронный // VIAM.RU : [сайт]. – 2024. – URL: https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2010/2010-205675.pdf (дата обращения: 01.10, 2025).

12. Кристаллическая структура Fe_2Ti (TiFe 2 rt). Текст: электронный // MATERIALS.SPRINGER.COM: [сайт]. – 2024. – URL: https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_0456744 (дата обращения: 01.10, 2025).

13. Чуликова Ж.Е. Исследование влияния деформационной наследственности на физико-механические свойства стали 08Х18Н10Т / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников // Электрометаллургия: ООО «Наука и технологии». – 2025. – № 9. – С. 15–23. – ISSN : 1684-5781.

14. Чуликова Ж.Е. Пути повышения срока эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников, О. В. Киселева, О. В. Скрипкина // Вестник машиностроения: Инновационное машиностроение. – 2026. – № 1. – С. 76–81. – ISSN : 0042-4633.

15. Чуликова, Ж. Е. Влияние холодной деформации на физико-механические свойства стали 08Х18Н10Т при кратковременном нагружении / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении. – 2025. – № 3. – С. 138–142. – ISSN: 1684-1107.

Демидов А.А.
заместитель директора
ООО «Металлург – Туламаш»
Россия, Тула
demidovanton1988@yandex.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА АК12, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Аннотация. В статье анализируется влияние переменного электрического тока на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АК12 (силумина) в процессе кристаллизации. Рассматриваются физические механизмы воздействия тока, включая электродинамическое перемешивание, локальный перегрев и электрохимические процессы,

способствующие гомогенизации расплава, измельчению фаз и дегазации. Экспериментально исследовано более 70 образцов, полученных при различных режимах токовой обработки. Металлографический анализ показал, что воздействие тока приводит к измельчению зерна, модификации эвтектики и формированию более равноосной и изотропной структуры с уменьшением грубых игольчатых включений кремния. Это способствует снижению износа режущего инструмента и уменьшению шероховатости обработанной поверхности. Однако испытания на статическую прочность показали, что влияние тока на предел прочности сплава АК12 находится в пределах ошибки эксперимента. Сделан вывод, что обработка расплава переменным электрическим током является эффективным методом модифицирования структуры, позволяющим получать отливки с улучшенными технологическими свойствами без изменения химического состава сплава.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АК12; переменный электрический ток; кристаллизация; микроструктура; механические свойства; модификация эвтектики; дегазация расплава.

Demidov A.A.
Deputy Director
LLC «Metallurg – Tulamash»
Russia, Tula
demidovanton1988@yandex.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF AK12 ALLOY SUBJECTED TO ALTERNATING ELECTRIC CURRENT

Abstract. The article analyzes the effect of alternating electric current on the structure and mechanical properties of aluminum alloy AK12 (silumin) in the process of crystallization. The physical mechanisms of current action are considered, including electrodynamic mixing, local superheating, and electrochemical processes that contribute to melt homogenization, phase grinding, and degassing. More than 70 samples obtained under various modes of current treatment were experimentally examined. Metallographic analysis showed that the impact of the current leads to grain grinding, modification of eutectics, and the formation of a more equiaxial and isotropic structure with a decrease in coarse needle-like silicon inclusions. This helps to reduce the wear of the cutting tool and reduce the roughness of the machined surface. However, static strength tests have shown that the effect of current on the tensile strength of the AK12 alloy is within the error of the experiment. It is concluded that melt treatment with alternating electric current is an effective method of modifying the structure, which makes it possible to obtain castings with improved technological properties without changing the chemical composition of the alloy.

Keywords: aluminum alloy AK12; alternating electric current; crystallization; microstructure; mechanical properties; modification of eutectics; melt degassing.

Воздействие переменного электрического тока на расплав алюминиевого сплава АК12 (силумин, Al–12%Si) приводит к существенным измене-

ниям в его структуре и, как следствие, к улучшению комплекса механических свойств. Суть эффекта заключается в комплексном влиянии тока на физико-химические процессы, протекающие в жидком металле.

Прохождение тока через расплав создаёт силы Лоренца, которые вызывают интенсивное перемешивание. Это способствует гомогенизации химического состава, разрушению дендритных структур и измельчению неметаллических включений.

Переменный ток высокой плотности вызывает локальный перегрев и последующее быстрое охлаждение приконтактных слоёв расплава. Это приводит к диспергированию (измельчению) фаз, в первую очередь кремниевой и эвтектики.

Электрохимические процессы. На межфазных границах возникают периодические изменения потенциала, что способствует деазотации и дегазации расплава (удалению водорода), а также модифицирующему воздействию на структуру.

В результате обработки переменным током в структуре сплава АК12 происходят следующие изменения:

– Измельчение зерна. Происходит переход от крупнозернистой столбчатой структуры к мелкозернистой, равноосной.

– Модификация эвтектики. Формируется тонко дифференцированная эвтектика, где кремний присутствует не в виде грубых пластин, а в виде мелких, разветвлённых кристаллов.

– Равномерное распределение фаз. Усиливается диспергирование и равномерное распределение кремниевой фазы по объёму отливки. Это может приводить к значительному повышению механических характеристик.

Таким образом, обработка расплава АК12 переменным электрическим током является эффективным методом модифицирования структуры, позволяющим получать отливки с повышенными эксплуатационными свойствами без изменения химического состава сплава.

Для исследований было залито 12 исходных (контрольных) образцов при температуре 750 °С и 4 образца на разрыв без приложения переменного тока в момент кристаллизации, но при разных температурах заливки расплавленного металла. Так же было залито 70 образцов с различными параметрами воздействия переменного электрического тока в момент кристаллизации и температурой заливки расплавленного металла 750 °С. После полного остывания формы выбивались с последующим удалением литниковой системы и клеймением образцов с двух сторон.

Перед проведением испытаний на разрывную прочность производился замер диаметра рабочей части образцов. При расчете площади поперечного сечения рабочей части образца использовались значения диаметров в самой узкой части образца. В случае если форма поперечного сечения рабочей части образца отличалась от круга, ее форму принимали за эллипс и площадь рассчитывали по формуле:

$$S = \frac{D_1 \cdot D_2}{4}\pi,$$

где D_1 – больший диаметр эллипса, мм; D_2 – меньший диаметр эллипса, мм.

Механические испытания отлитых образцов производились на разрывной машине Р10. Значение усилия на разрыв P определяем по показателям шкалы машины Р10 и измеряется в кг.

Предел прочности $\sigma_В$ вычисляли с помощью программы Microsoft Excel по формуле:

$$\sigma_В = 9{,}8\frac{P}{S},$$

где $\sigma_В$ – предел прочности, МПа; P – усилие на разрыв, Н; S – площадь поперечного сечения образца, мм^2.

Результаты расчетов среднего значения предела прочности $\overline{\sigma_в}$ всех групп образцов были сведены в таблицу.

Таблица

Значение прочности $\overline{\sigma_в}$ исследуемых образцов в зависимости от параметров воздействия электрического тока на расплав в момент кристаллизации

Частота воздействия, кГц	Ток, А	[Уравнение], МПа	Относительная ошибка,%
исходный	0	156,05	5,95
0	1	154,27	13,95
0	4	150,44	2,58
0,244	4	160,97	14,30
0,457	4	155,38	11,37
2,4	1	164,35	3,36
2,4	4	159,20	6,72
4,57	1	160,19	7,69
4,57	4	157,86	13,42
24,4	4	161,67	8,68
45,7	4	158,79	11,25
2440	1	156,56	5,24
4570	1	151,07	8,23

Как видно из таблицы 1, значения всех $\overline{\sigma_в}$ расположены в пределах относительной ошибки $\overline{\sigma_в}$ исходных образцов. Для большей наглядности данный факт был представлен на рисунке 1.

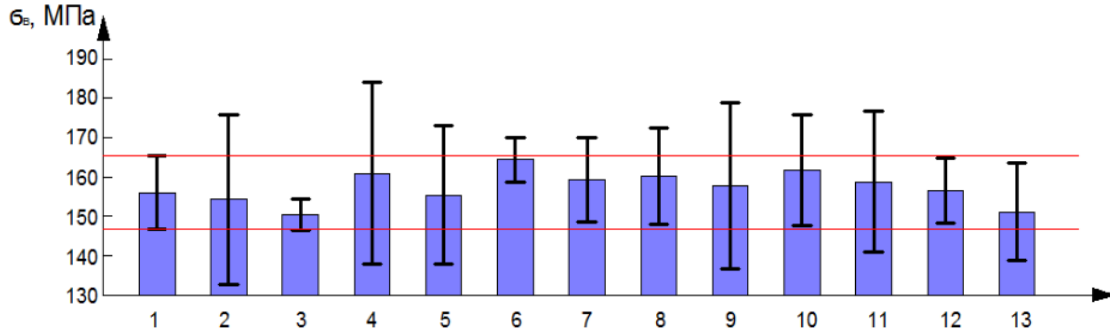


Рис. 1. Значение прочности $\sigma_в$ исследуемых образцов в зависимости от параметров воздействия электрического тока на расплав в момент кристаллизации: 1 – $\sigma_в$ исходных образцов; 2 – $\sigma_в$ образцов, обработанных постоянным током 0,5 А; 3 – $\sigma_в$ образцов, обработанных постоянным током 3А; 4 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 4А и частотой 0,244 кГц; 5 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 4А и частотой 0,457 кГц; 6 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 1А и частотой 2,4 кГц; 7 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 4А и частотой 2,4 кГц; 8 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 1А и частотой 4,57 кГц; 9 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 4А и частотой 4,57 кГц; 10 – $\sigma_в$образцов, обработанных переменным током 4А и частотой 24,4 кГц; 11 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 4А и частотой 45,7 кГц; 12 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 1А и частотой 2440 кГц; 13 – $\sigma_в$ образцов, обработанных переменным током 1А и частотой 4570 кГц

После проведения испытаний на прочность при статическом растяжении отлитые образцы подвергались металлографическим исследованиям. Металлографические исследования проводились по стандартной методике, заключавшейся в шлифовании с последующим полированием и травлением образцов.

Шлифование образцов производилось на шлифовальном станке с использованием шлифовальных бумагах зернистостью: Р80, Р120, Р180, Р240, Р400, Р600, Р1000, Р1500 и Р2000 [1]. Шлифовка образцов производилась с поочередной сменой шлифовальной бумаги с большим зерном на бумагу с меньшим зерном и поворотом шлифа на 90° в момент смены шлифовальной бумаги. Смена шлифовальной бумаги с большим зерном на меньшее производилась в момент, когда с обрабатываемой поверхности шлифа полностью удалялись следы предыдущей абразивной обработки.

После шлифования производилась полировка шлифов с использованием полировальных паст [2], нанесенных на бархатную основу. Использовались полировальные алмазные пасты марок: АСМ 14/10 и АСМ 0,5/0,1. Полировка пастой АСМ 14/10 применялась для удаления следов механической обработки шлифа на шлифовальной бумаге Р2000 и преданию обрабатываемой поверхности вида металлического зеркала. Полировальная паста АСМ 0,5/0,1 использовалась для финишной обработки поверхности шлифа и подготовки его к травлению.

После полировки рабочая поверхность шлифа промывалась в проточной воде для удаления полировальной пасты с последующей сушкой и установкой шлифа на предметный столик микроскопа для проверки рабочей поверхности шлифа на наличие царапин. В случае обнаружения царапин на поверхности шлифа полировка производилась заново до полного удаления царапин с поверхности шлифа. В случае отсутствия царапин на поверхности шлифа, производилось травление его рабочей поверхности.

В качестве травителя использовали 10% водный раствор азотной кислоты HNO_3. Травление производилось в течении 10 – 15 секунд путем опускания шлифа в чашку Петри с травителем. После травления следовала промывка шлифа в проточной воде, протирание его рабочей поверхности спиртом и сушка. Когда шлиф полностью высыхал, его устанавливали на предметный столик микроскопа для оценки качества травления.

В случае получения перетравленной микроструктуры рабочая поверхность шлифа переполировывалась с последующим повторением операций, приведенных выше. В случае получения недотравленной структуры рабочая поверхность шлифа опускалась в емкость с травителем на 3 – 5 секунд с последующим промыванием в проточной воде, протиранием спиртом и сушкой. При достижении необходимого качества травления рабочей поверхности микрошлифа производился металлографический анализ. Металлографический анализ микрошлифов производился с использованием микроскопного комплекса на основе исследовательского металлографического инверсионного микроскопа ЛабоМет-и вариант 2 с системой визуализации.

Металлографический анализ показал, что: во всех образцах, залитых без воздействия при температуре расплавленного металла в момент заливки равной 750 °С, кремний имеет форму грубых иглообразных включений, расположенных группой, расходящейся из общего центра (рисунок 2).

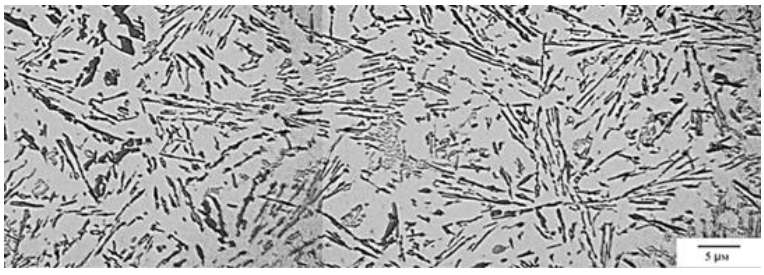
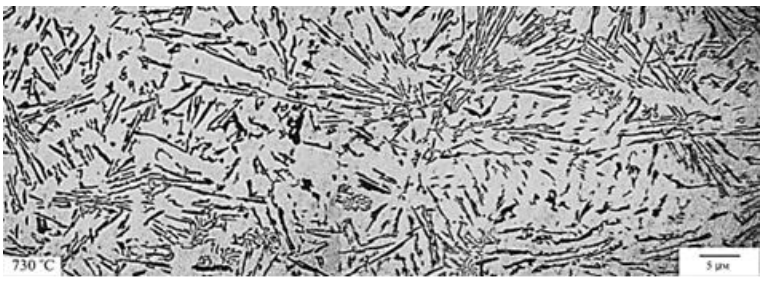
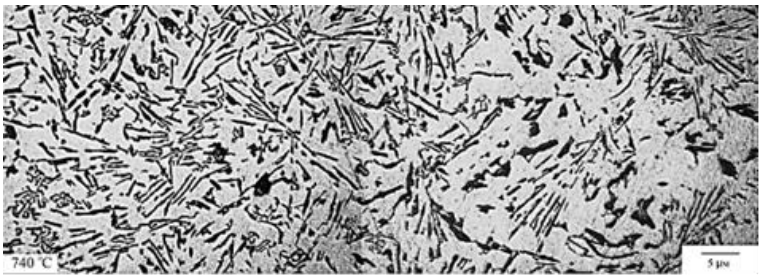


Рис. 2. Микроструктуры образцов из сплава АК12 в исходном состоянии

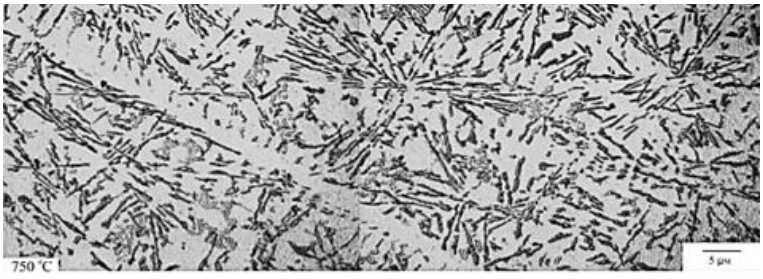
При изменении температуры заливки исходных образцов в интервале температур от 730 до 770 °С автором не было замечено серьезного изменения микроструктуры исследуемого материала (рисунок 3). Также при анализе микрофотографий, приведенных на рисунке 10 видно, что при увеличении температуры заливки до 790 °С, количество грубых игольчатых включений кремния существенно снижается, а размер их групп уменьшается в несколько раз.



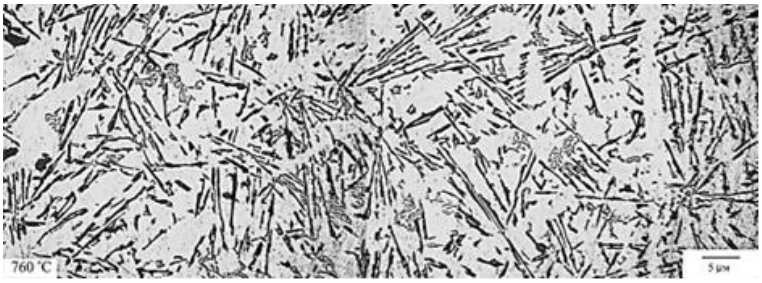
а



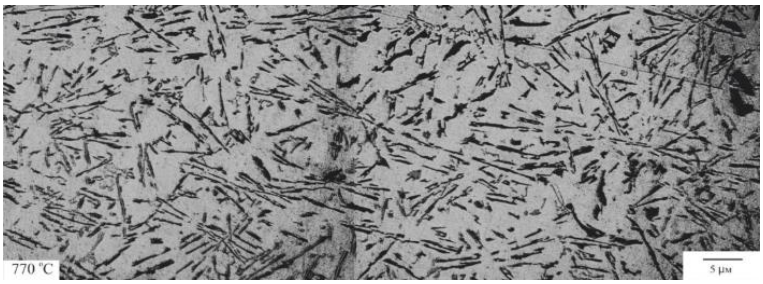
б



в



г



д

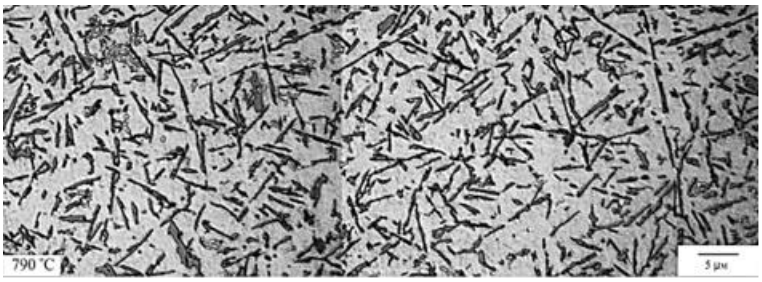


Рис. 3. Микроструктуры образцов из сплава АК12 с различными температурами расплавленного металла в момент заливки

Образцы из исследуемого материала, залитые под воздействием электрического тока, имеют структуру отличную от исходной. Грубые иглы кремния в микроструктурах вышеупомянутых образцов встречаются заметно реже, а формирование их в компактные группы с общим центром полностью исчезло (рисунок 4) [3–7].

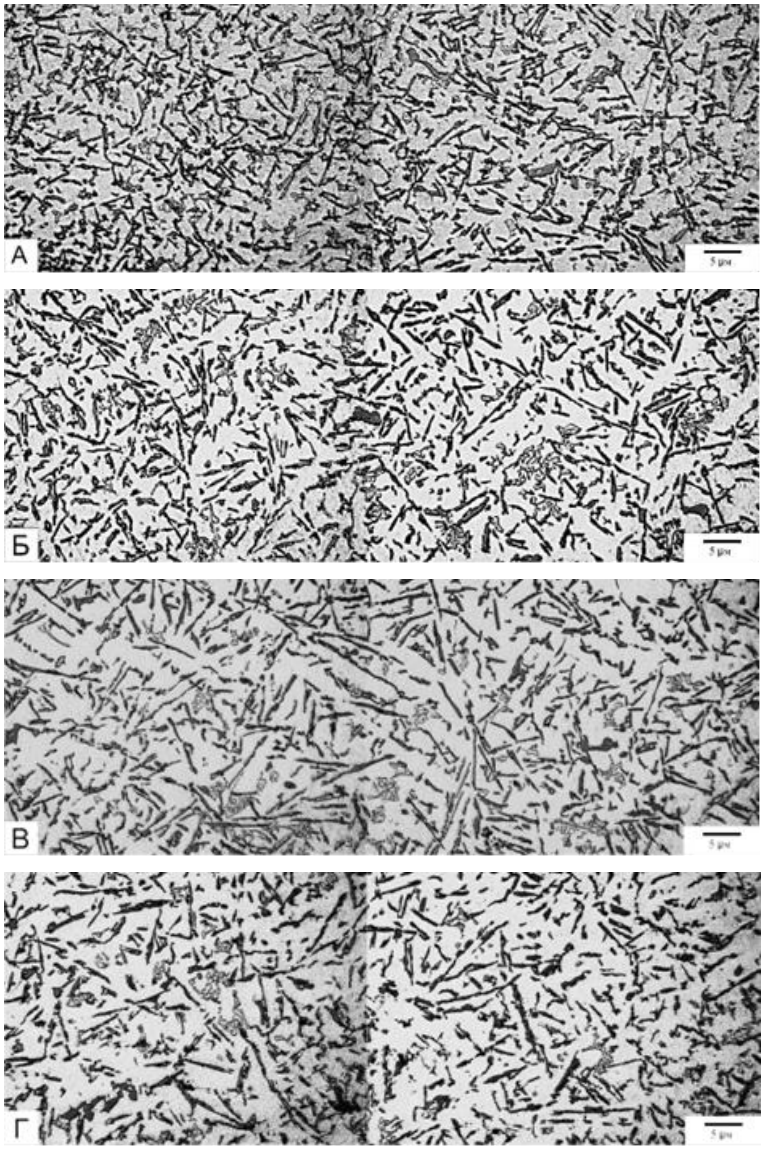


Рис. 4А–Г. Микроструктура силуминового сплава АК12 после кристаллизаций под воздействием электрического тока:

А – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 0,244 кГц и током 4 А; Б – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 0,457 кГц и током 4 А; В – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 2,4 кГц и током 4 А; Г – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 4,57 кГц и током 4 А

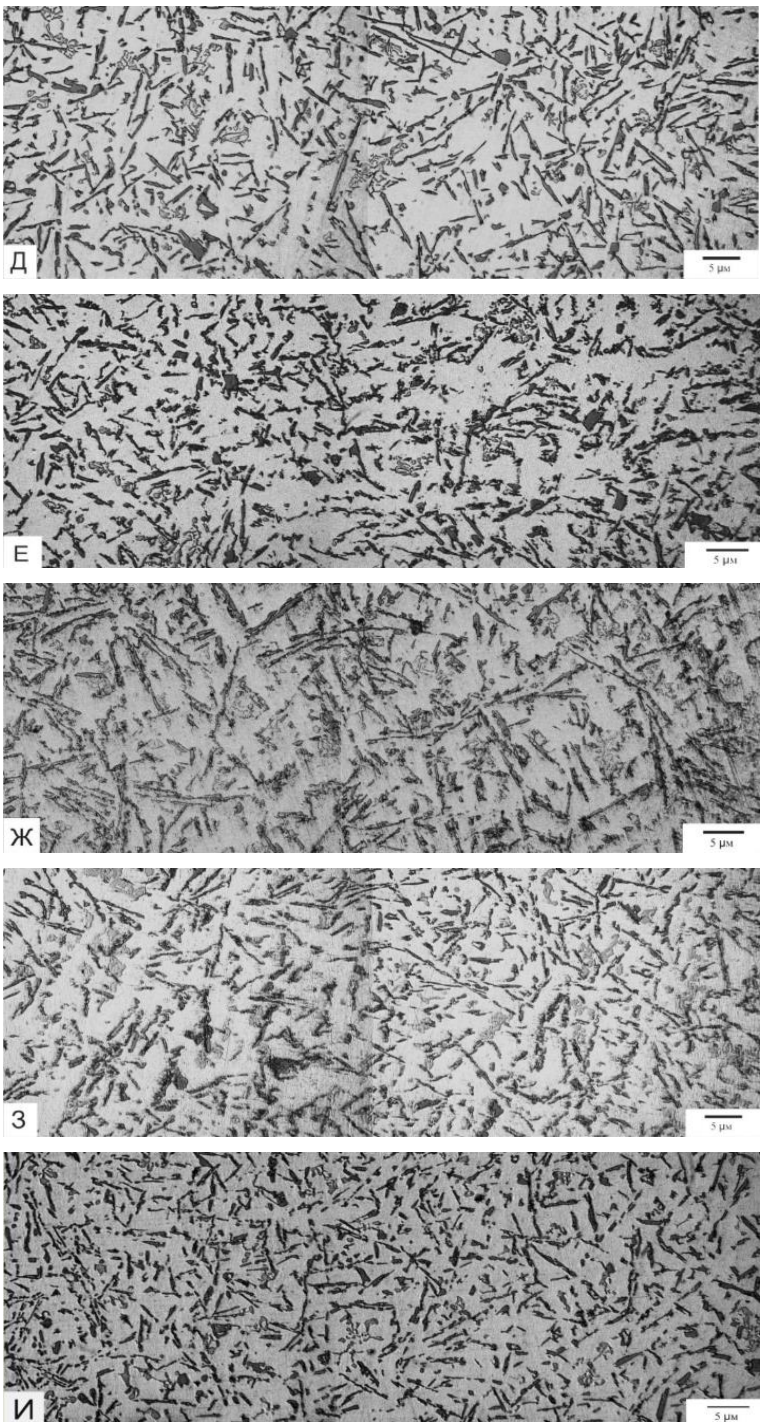


Рис. 4Д–И. Микроструктура силуминового сплава АК12 после кристаллизаций под воздействием электрического тока:

Д – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 24,4 кГц и током 4 А; Е – чтруктура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 45,7 кГц и током 4 А; Ж – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 2440 кГц и током 1А; З – структура сплава после воздействия переменным электрическим током с частотой 4570 кГц и током 4 А; И – структура сплава после воздействия постоянного электрическим током 1 А

В целом структура исследуемого сплава становится более равноосной и изотропной, что в свою очередь позволяет снизить на 30 – 70% износ режущего инструмента и уменьшить шероховатость обработанной поверхности. Помимо увеличения срока службы, режущего инструмент измельчение литой структуры, приводит к возможности снижения времени выдержки при термической обработке отлитых деталей [8].

Так же отлито 3 образца с различными параметрами воздействия переменного тока, приложенного в момент кристаллизации, с мелкозернистой структурой включений кремния (рисунок 5).

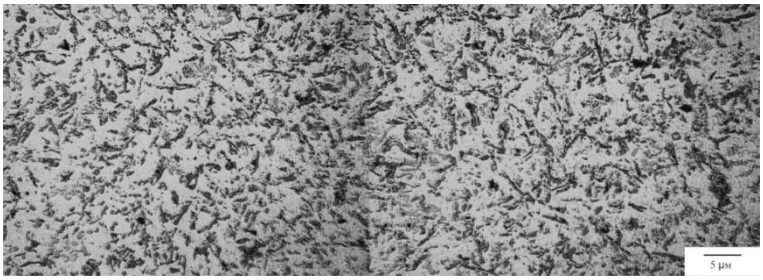


Рис. 5. Микроструктура силумина с компактными включениями кремния (частота воздействия электрического тока 2,4 кГц, ток воздействия 7,4 А)

Но при повторной шлифовке, полировки и травлении структура становится такой же или близкой к структуре, показанной на рисунке 4. Фотография микроструктуры образца с мелкозернистой формой включений кремния после вторичной шлифовки, полировки и травления приведена на рисунке 6. Главная причина подобных изменений микроструктуры локального характера, по мнению автора, заключается в неполном выгорании модификатора из расплава.

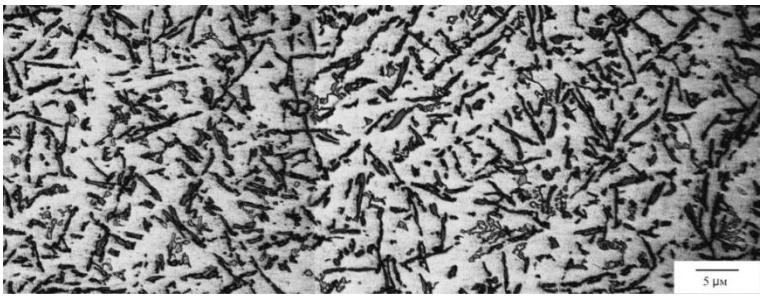


Рис. 6. Микроструктура силумина с компактными включениями кремния (частота воздействия электрического тока 2,4 кГц, ток воздействия 7,4 А с повторной шлифовкой, полировкой и травлением)

В ходе проведения испытаний на статическую прочность было определено, что воздействие тока в момент кристаллизации не оказало существенного влияния на прочность исследуемых образцов из силуминового сплава АК12 и колеблется вблизи предела ошибки эксперимента.

Воздействие тока на расплав в момент кристаллизации оказывает существенное влияние на структуру силуминового сплава АК12. Микроструктура отливок, закристаллизовавшаяся под воздействием тока, имеет более анизотропную конфигурацию, чем микроструктура отливок, закристаллизовавшихся без токовой обработки. Воздействие тока в момент кристаллизации приводит к полному или частичному удалению дендритов кремния из объема отливки.

Придание включениям Si более равноосной формы и равномерному распределению в теле отливки позволяет снизить на 30 – 70% износ режущего инструмента и уменьшить шероховатость обработанной поверхности.

Помимо увеличения срока службы, режущего инструмент измельчение литой структуры, приводит к возможности снижения времени выдержки при термической обработке отлитых деталей.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава.

2. ГОСТ25593-83. Пасты алмазные. Технические условия.

3. Демидов А.А. Структурообразование сплава АК12 при кристаллизации под воздействием электромагнитных полей [Текст]: V – я магистерская научно – техническая конференция. / А.А. Демидов. – 2010 г.

4. Демидов А.А. Закономерности изменения структуры сплава АК12 при кристаллизации под воздействием переменных электромагнитных полей [Текст]: IV международная Конференция «Деформация и Разрушение Материалов и Наноматериалов». / А.А. Демидов, И.М. Кавицкий, А.Е. Гвоздев, Л.В. Мясникова. – М: ИМЕТ РАН – 2011 г.

5. Демидов А.А. Воздействие переменных электромагнитных полей и механических колебаний на структуру и свойства материалов [Текст]: Материалы международной научно-практической конференции Многомасштабное моделирование структур и нанотехнологии, посвященной 190-летию со дня рождения академика Пафнутия Львовича Чебышёва, столетия со дня рождения академика Сергея Васильевича Вонсовского и 80-летия со дня рождения член-корреспондента Виктора Анатольевича Буравихина / А.А. Демидов, И.М. Кавицкий, Б.А. Рушаник, А.Е. Гвоздев. – Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н. Толстого, 2011 г.

6. Демидов А.А. Изменение структуры силумина при обработке переменными электромагнитными полями в процессе кристаллизации [Текст] / А.А. Демидов, И.М. Кавицкий, А.Е. Гвоздев. – Тула издание ТулГу.: Известия Тульского государственного университета. – 2011 г. – №4.

7. Демидов А.А. Повышение дисперсности структуры литейного алюминиевого сплава АК12 в результате обработки переменными электромагнитными полями [Текст]: V международная Конференция «Деформация и Разрушение Материалов и Наноматериалов». / А.А. Демидов, И.М. Кавицкий, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев. – М: ИМЕТ РАН. – 2013 г.

8. Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов [Текст] / М.Б. Альтман, Н.П. Стромская – М.: Металлургия, 1984.

Михонов В.В.
студент
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
Россия, Москва
mihonov.valera@mail.ru
Хажакян В.О.
студент
Шанхайский университет ЦзяоТун
Китай, Шанхай
tdv_2010@mail.ru
Михонов И.В.
ученик 10 класса
МБОУ «Средняя общеобразовательная школа-интернат»
Россия, Кашира
ignatmihonov972@gmail.com

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЛАВА AL-5%CU В ПРОГРАММЕ THERMO-CALC С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Аннотация. В статье представлены результаты термодинамического моделирования сплава Al-5%Cu в программном комплексе Thermo-Calc. Построена равновесная диаграмма состояния системы Al-Cu, определен фазовый состав сплава в интервале температур 300–700°C. Установлены критические точки: солидус (557°C) и ликвидус (648°C). Рассчитана температурная зависимость плотности сплава в диапазоне 300–1060°C. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами, полученными из справочника Н.П. Лякишева (температуры фазовых переходов) и работы К.В. Никитина и др. (плотность расплава). Выявлено, что расчетные значения систематически завышают температуры солидуса и ликвидуса на 9–10°C (относительная погрешность 1,57%). Погрешность расчета плотности составляет 1–2%, что допустимо для инженерных расчетов. Установлено, что модель Thermo-Calc не воспроизводит нелинейный характер зависимости плотности от температуры, наблюдаемый в эксперименте, что связано с отсутствием учета структурных изменений в расплаве (кластерообразования, ближнего порядка). Сделан вывод о применимости Thermo-Calc для прогнозирования равновесных свойств сплавов с учетом выявленных погрешностей.

Ключевые слова: Al-Cu сплав, термодинамическое моделирование, Thermo-Calc, фазовая диаграмма, плотность, верификация, погрешность, CALPHAD.

Mikhonov V.V.
Student
Moscow Aviation Institute (National Research University)
Russia, Moscow
mihonov.valera@mail.ru
Khazhakyan V.O.
Student
Shanghai Jiao Tong University
China, Shanghai
tdv_2010@mail.ru
Mikhonov I.V.
10th grade student

MBOU «Secondary boarding school»
Russia, Kashira
ignatmihonov972@gmail.com

VERIFICATION OF THE RESULTS OF THERMODYNAMIC MODELING OF Al-5%Cu ALLOY IN THERMO-CALC SOFTWARE WITH EXPERIMENTAL DATA

Abstract. The article presents the results of thermodynamic modeling of Al-5%Cu alloy in the Thermo-Calc software package. The equilibrium phase diagram of the Al-Cu system was constructed, the phase composition of the alloy was determined in the temperature range 300–700°C. The critical points were established: solidus (557°C) and liquidus (648°C). The temperature dependence of the alloy density was calculated in the range 300–1060°C. The calculated data were compared with experimental results obtained from the reference book by N.P. Lyakishev (phase transition temperatures) and the work by K.V. Nikitin et al. (melt density). It was revealed that the calculated values systematically overestimate the solidus and liquidus temperatures by 9–10°C (relative error 1.57%). The density calculation error is 1–2%, which is acceptable for engineering calculations. It was established that the Thermo-Calc model does not reproduce the nonlinear nature of the temperature dependence of density observed in the experiment, which is due to the lack of consideration of structural changes in the melt (cluster formation, short-range order). A conclusion is made about the applicability of Thermo-Calc for predicting the equilibrium properties of alloys taking into account the identified errors.

Keywords: Al-Cu alloy, thermodynamic modeling, Thermo-Calc, phase diagram, density, verification, error, CALPHAD.

Современное материаловедение невозможно без прогнозирования свойств материалов на этапе проектирования. Традиционные экспериментальные методы требуют значительных временных и материальных затрат, поэтому все большее значение приобретает компьютерное моделирование. Одним из мировых лидеров в этой области является программный комплекс Thermo-Calc, позволяющий рассчитывать равновесные диаграммы состояния, фазовый состав, критические точки и теплофизические свойства сплавов [2].

Объектом данного исследования выбрана классическая для металловедения бинарная система Al-Cu. Сплавы этой системы широко используются в авиастроении, машиностроении и судостроении благодаря высокой прочности после термической обработки. Особый интерес представляет сплав с содержанием меди 5%, поскольку именно в диапазоне 4–6% Cu достигается максимальный эффект упрочнения при старении.

Цель настоящей работы – верификация результатов термодинамического моделирования сплава Al-5%Cu в программе Thermo-Calc путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными результатами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: построение диаграммы состояния Al-Cu, определение фазового состава и плотности сплава в зависимости от температуры, количественный анализ погрешностей модели.

Моделирование выполнялось в программе Thermo-Calc версии 2026a с использованием термодинамической базы данных ALDEMO. Состав сплава задавался как 95% Al и 5% Cu (по массе). Расчет равновесной диаграммы состояния проводился в диапазоне температур 300–700°C с шагом 50°C и диапазоне концентраций Cu от 0 до 5% с шагом 0,5%. Фазовый состав и плотность рассчитывались методом одноосного сканирования по температуре от 300°C до 1060°C.

Для верификации результатов расчетные данные сравнивались с экспериментальными результатами, полученными из фундаментального справочника под редакцией Н.П. Лякишева [1] (температуры фазовых переходов) и работы российских исследователей Никитина К.В. и др. [3] (плотность расплава в диапазоне температур 760–1060°C).

Построенная в Thermo-Calc диаграмма состояния системы Al-Cu для области концентраций меди от 0 до 5% представлена на рисунке 1.

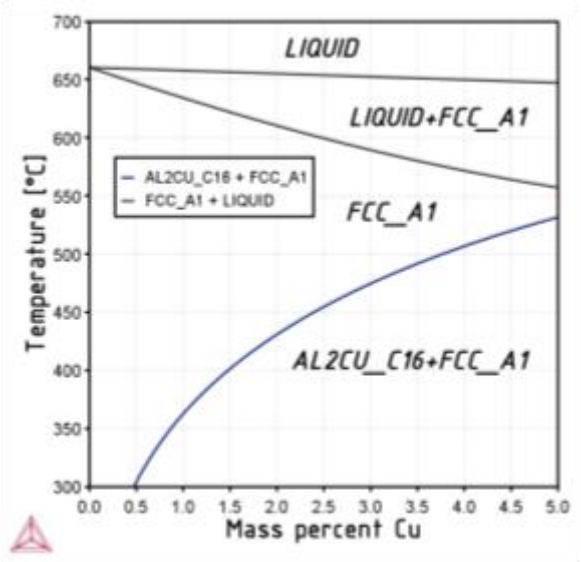


Рис. 1. Диаграмма состояния системы Al-Cu (расчет в Thermo-Calc)

В исследуемом диапазоне температур идентифицированы следующие фазы: FCC_A1 (α-твердый раствор меди в алюминии с ГЦК-решеткой), AL2CU_C16 (интерметаллидная фаза θ-Al_2Cu с тетрагональной решеткой) и LIQUID (жидкая фаза).

Фазовый состав сплава Al- 5%Cu в зависимости от температуры приведен в таблице 1.

Таблица 1

Фазовый состав сплава Al-5%Cu

Температурный интервал, °C	Фазовый состав
300 – 532	FCC_A1 + AL2CU_C16
532 – 557	FCC_A1
557 – 646	LIQUID + FCC_A1
> 646	LIQUID

Критические температуры, полученные в результате моделирования, составили:

- солидус (температура начала плавления) – 557°C;
- ликвидус (температура полного перехода в жидкое состояние) – 648°C.

Температурная зависимость плотности сплава Al-5%Cu, рассчитанная в Thermo-Calc, представлена на рисунке 2.

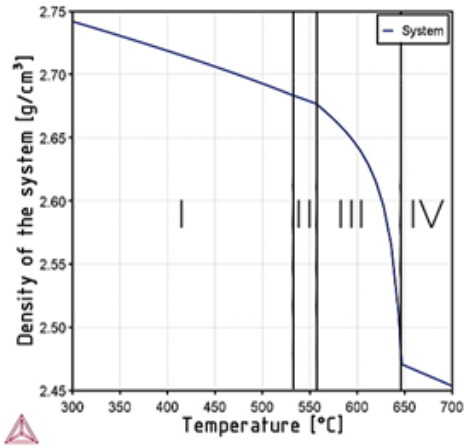


Рис. 2. Зависимость плотности сплава Al-5%Cu от температуры (расчет Thermo-Calc, 300–700°C)

На графике можно выделить четыре участка, соответствующие различным фазовым состояниям.

В области твердого состояния (300–532°C) плотность снижается с 2,75 до 2,68 г/см^3 за счет теплового расширения кристаллической решетки.

В интервале 557–646°C происходит наиболее интенсивное снижение плотности (с 2,66 до 2,47 г/см^3), обусловленное плавлением сплава и появлением жидкой фазы. Выше температуры ликвидуса плотность продолжает линейно снижаться с ростом температуры.

На рисунке 3 представлен расширенный расчет плотности до 1060°C.

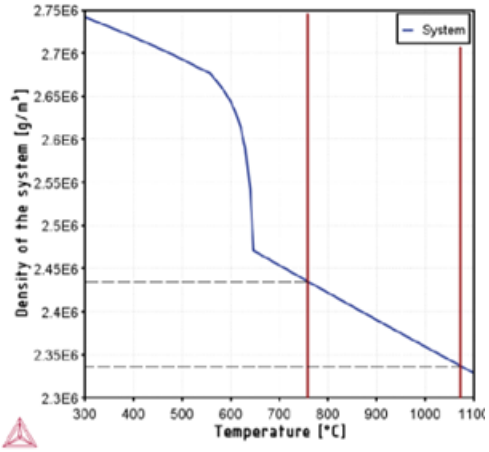


Рис. 3. Зависимость плотности сплава Al-5%Cu от температуры 300–1060°C (расчет Thermo-Calc)

Экстраполяция расчетных данных до 1060°C дает значение плотности ~2,34 г/см^3.

Согласно фундаментальному справочнику под редакцией Н.П. Лякишева [1], экспериментально определенная температура эвтектического превращения в системе Al–Cu составляет 548°C, а температура ликвидуса для сплава с 5% Cu – приблизительно 638°C (рисунок 4).

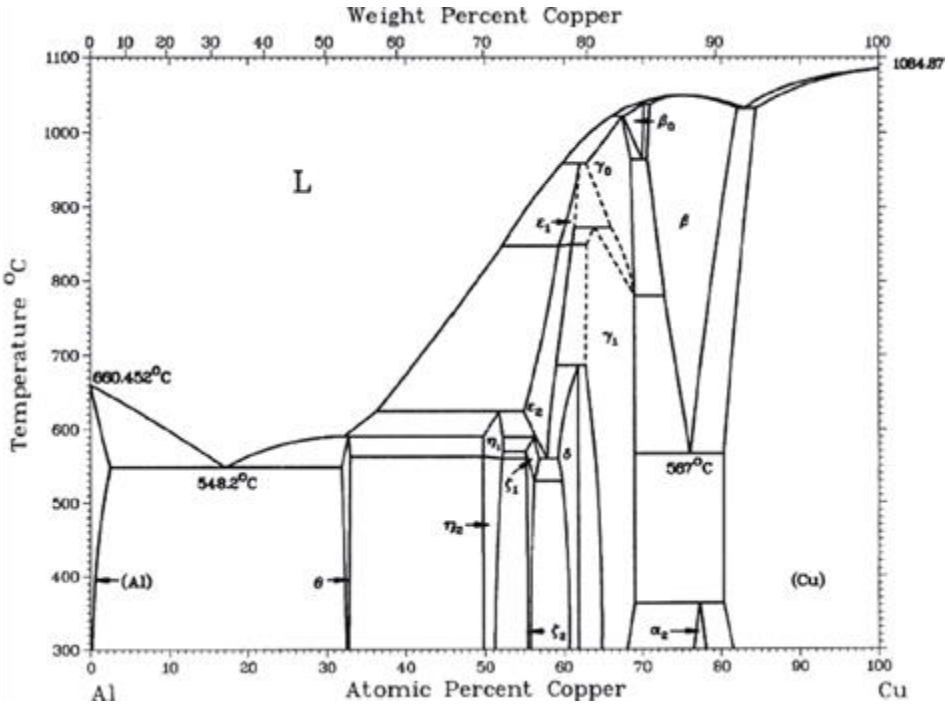


Рис. 4. Экспериментальные данные системы Al-Cu (5%) [1]

Сравнение расчетных и экспериментальных значений показано в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение критических температур

Критическая точка	Расчет Thermo-Calc, °C	Эксперимент [1], °C	Абсолютное расхождение, °C	Относительная погрешность,%
Солидус (эвтектика)	557	548	+9	1,64
Ликвидус	648	638	+10	1,57

Термодинамическая модель Thermo-Calc систематически завышает критические температуры на 9–10°C. Тем не менее, относительная погрешность составляет менее 1,7%, что допустимо для инженерных расчетов.

В работе Никитина К.В. и др. [3] изучено влияние структуры шихтовых заготовок на плотность расплава Al-5%Cu в диапазоне температур 760–1060°C (рисунок 5). Экспериментально установлено, что плотность расплава при 700°C составляет 2,42–2,48 г/см^3 в зависимости от типа шихты, а при 1060°C – 2,33–2,38 г/см^3.

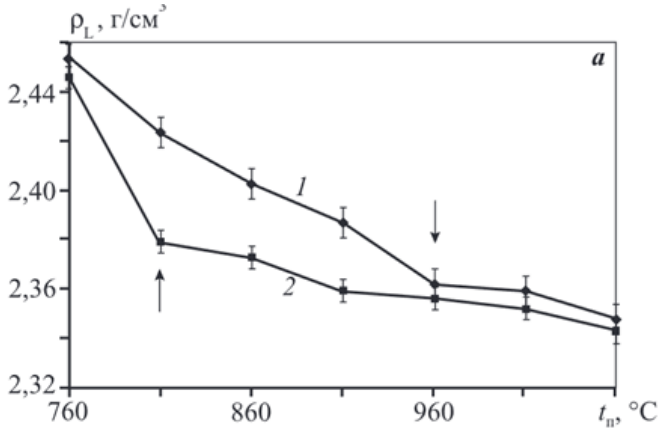


Рис. 5. Экспериментальная зависимость плотности сплава Al-5%Cu от температуры [3]

Сравнение расчетных и экспериментальных значений плотности приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение плотности сплава Al-5%Cu

Температура, °C	Расчет Thermo-Calc, г/см^3	Эксперимент [3], г/см^3	Расхождение, г/см^3	Относительная погрешность,%
700	2,45	2,42–2,48	±0,03	~1,2
1060	2,34	2,33–2,38	±0,02–0,04	~1,5

Сравнение выявило два типа расхождений:

1. **По абсолютным значениям.** Расчетные значения плотности находятся внутри экспериментальных интервалов, погрешность составляет 1–2%, что является приемлемым для инженерных расчетов.

2. **По характеру зависимости.** Расчет Thermo-Calc демонстрирует строго линейное снижение плотности с температурой, тогда как эксперимент [3] показывает нелинейное снижение с переменным наклоном кривой.

Методология CALPHAD, лежащая в основе Thermo-Calc, описывает жидкую фазу как идеальный или регулярный раствор без учета структурных изменений в расплаве (кластерообразования, ближнего порядка). В реальности при нагреве разрушаются кластеры и изменяется ближний порядок расположения атомов, что влияет на плотность и дает нелинейный эффект. Модель эти эффекты не учитывает.

В результате проведенного исследования установлено следующее:

1. Термодинамическое моделирование сплава Al-5%Cu в программе Thermo-Calc позволило построить равновесную диаграмму состояния, определить фазовый состав и рассчитать плотность в интервале температур 300–1060°C.

2. Критические температуры, полученные расчетным путем, составляют: солидус – 557°C, ликвидус – 648°C. Сравнение с экспериментальными данными справочника [1] выявило систематическое завышение температур

на 9–10°C, что соответствует относительной погрешности 1,6–1,7% и является допустимым для инженерных расчетов.

3. По абсолютным значениям плотности расчету Thermo-Calc можно доверять: погрешность составляет 1–2% относительно экспериментальных данных [3].

4. Выявлено принципиальное ограничение модели: Thermo-Calc не воспроизводит нелинейный характер зависимости плотности от температуры, наблюдаемый в эксперименте. Это связано с тем, что методология CALPHAD описывает жидкую фазу как идеальный раствор и не учитывает структурные превращения в расплаве (кластерообразование, ближний порядок).

5. Программный комплекс Thermo-Calc рекомендуется для инженерных расчетов равновесных фазовых равновесий и теплофизических свойств сплавов с учетом выявленных погрешностей. Для исследования тонких структурных эффектов в расплавах требуются дополнительные экспериментальные исследования или методы молекулярной динамики.

Список литературы

1. Лякишев Н.П., Банных О.А., Рохлин Л.Л. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: в 3 т. Т. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

2. Thermo-Calc Software 2026: официальный сайт. – URL: https://thermocalc.com/support/getting-started-guides/thermo-calc-guide/ (дата обращения: 31.03.2026).

3. Никитин К.В., Никитин В.И., Тимошкин И.Ю., Кривопалов Д.С., Черников Д.Г. Влияние структуры шихтовых заготовок, перегрева и времени выдержки расплавов на свойства сплавов Al–5 мас.% Cu в жидком и твердом состояниях // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 1. – С. 27–33.

Баскаков А.П.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
std.baskakov@bk.ru
Оганесян Р.О.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Фокина М.С.
к.т.н., доцент Центра проектной деятельности
Московский политехнический университет
Россия, Москва

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОКОМПЕНСИРУЮЩИХ ПРОКЛАДОК НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения герметичности фланцевых соединений, работающих в условиях повышенных температурных нагрузок. При нагреве элементов соединения возникает температурное расширение материалов, приводящее к изменению усилия затяжки, росту нагрузки на болты и прокладку, а также к возможной разгерметизации соединения. Особое внимание уделено влиянию коэффициента линейного термического расширения материала прокладки на работу фланцевого узла. В работе проведён анализ материалов, применяемых для изготовления уплотнительных прокладок, включая винилпласт, паронит, эластомерные материалы, композиционные материалы и графитовые материалы. Показано, что материалы с высоким коэффициентом линейного термического расширения при нагреве создают дополнительное распирающее усилие между фланцами, что снижает надёжность соединения. В качестве перспективного решения предложено применение комбинированной термокомпенсирующей прокладки, включающей компенсирующий элемент из материала с пониженным коэффициентом линейного расширения. Испытания выполнялись с моментом затяжки, формирующим усилие 5 кН на болте, при нагреве от 0 до 150 °С.

Ключевые слова: фланцевое соединение; термокомпенсация; паронитовая прокладка; комбинированная прокладка; температурное расширение; коэффициент линейного расширения; герметичность; термическая нагрузка.

Baskakov A.P.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
std.baskakov@bk.ru
Oganesyan R.O.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Fokina M.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Center for Project Activities
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THERMAL COMPENSATING GASKETS BASED ON MODERN POLYMERIC AND COMPOSITE MATERIALS

Abstract. This article examines the problem of improving the tightness of flange joints operating under elevated temperature loads. Heating of the joint components causes thermal expansion of the materials, leading to changes in tightening force, increased load on the bolts and gasket, and possible joint leakage. Particular attention is paid to the influence of the coefficient of linear thermal expansion of the gasket material on the performance of the flange assembly. The paper analyzes materials used to manufacture sealing gaskets, including vinyl plastic, paronite, elastomeric materials, composite materials, and graphite materials. It has been shown that materials with a high coefficient of linear thermal expansion create additional expanding forces between flanges when heated, reducing the reliability of the connection. A promising solution is proposed using a combined thermal-compensating gasket, incorporating a compensating element made of a material with a reduced coefficient of linear expansion. Tests were performed with a tightening torque generating a force of 5 kN on the bolt, with heating from 0 to 150 °C.

Keywords: flange connection; thermal compensation; paronite gasket; combined gasket; thermal expansion; coefficient of linear expansion; tightness; thermal load.

Фланцевые соединения широко применяются в химической, нефтегазовой, энергетической и других отраслях промышленности для соединения трубопроводов, аппаратов и оборудования, работающего под давлением. Надёжность таких соединений во многом определяется их способностью сохранять герметичность при воздействии давления, температуры, вибраций и механических нагрузок. Нарушение герметичности фланцевого соединения может привести к утечке рабочей среды, внеплановой остановке оборудования, экономическим потерям, а также к экологическим и производственным рискам.

Одной из основных причин нарушения герметичности фланцевых соединений является температурное расширение материалов. При повышении температуры элементы соединения изменяют свои геометрические размеры. При этом фланцы, болты, шайбы и прокладка изготавливаются из материалов с различными коэффициентами линейного термического расширения. В результате в соединении возникают дополнительные напряжения, изменяется усилие затяжки, происходит перераспределение нагрузки между элементами узла, что может привести к снижению герметичности.

Особенно важным элементом фланцевого соединения является прокладка. Именно она обеспечивает уплотнение между соединяемыми поверхностями и препятствует утечке рабочей среды. Однако многие традиционные материалы прокладок, включая паронит, эластомерные материалы, винилпласт и композиты, обладают коэффициентом линейного термического расширения, превышающим коэффициент расширения стали. При нагреве такая прокладка стремится увеличиться в размерах, но из-за зажатого поло-

жения между фланцами её свободное расширение ограничивается. В результате возникает дополнительное распирающее усилие, которое передаётся на фланцы и крепёжные элементы.

При циклическом нагреве и охлаждении проблема усиливается. Материал прокладки может частично терять упругие свойства, изменять форму, подвергаться ползучести или остаточной деформации. Это приводит к снижению усилия обжатия, появлению микрозазоров и повышению вероятности утечки рабочей среды. Поэтому при проектировании фланцевых соединений необходимо учитывать не только механическую прочность элементов, но и термомеханическое поведение прокладочных материалов.

Актуальность данной работы связана с необходимостью разработки термокомпенсирующих прокладок, способных снижать влияние температурных деформаций на работу фланцевых соединений. Одним из перспективных направлений является применение комбинированных прокладок, состоящих из нескольких материалов с различными коэффициентами линейного расширения. Такой подход позволяет частично компенсировать температурные деформации и уменьшить дополнительную нагрузку на элементы соединения.

Целью данной работы является разработка и исследование термокомпенсирующей прокладки для фланцевого соединения, работающего в условиях повышенных температурных нагрузок.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведён анализ влияния температурного расширения на работу фланцевого соединения; рассмотрены материалы, применяемые для изготовления прокладок; разработан вариант комбинированной прокладки с компенсирующим элементом; проведены экспериментальные испытания модели фланцевого соединения при нагреве; выполнена сравнительная оценка эффективности паронитовой и комбинированной прокладок.

Научная новизна работы заключается в применении комбинированной конструкции прокладки, в которой снижение дополнительной термической нагрузки достигается за счёт сочетания материалов с различными коэффициентами линейного термического расширения.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанного решения в промышленном оборудовании, работающем при повышенных температурах, без необходимости существенной модернизации существующих фланцевых соединений. Основные исходные положения работы основаны на ранее подготовленном тексте статьи по разработке термокомпенсирующих прокладок для фланцевых соединений.

Фланцевое соединение представляет собой разъёмное герметичное соединение, состоящее из двух фланцев, крепёжных элементов и уплотнительной прокладки. Герметичность такого соединения обеспечивается за счёт предварительного обжатия прокладки болтами или шпильками. При правильной затяжке прокладка заполняет микронеровности контактирующих поверхностей и препятствует утечке рабочей среды.

При эксплуатации соединения в условиях повышенной температуры происходит тепловое расширение всех его элементов. Однако величина расширения зависит от материала каждой детали. Металлические элементы соединения, как правило, имеют относительно невысокий коэффициент линейного термического расширения, тогда как многие полимерные, эластомерные и композиционные материалы расширяются значительно сильнее. В результате при нагреве прокладка может деформироваться интенсивнее, чем фланцы и болты.

Если прокладка изготовлена из материала с высоким коэффициентом линейного расширения, то при нагреве она создаёт дополнительное давление на фланцы. Это приводит к росту нагрузки в соединении. При последующем охлаждении материал прокладки может частично потерять форму или упругие свойства, что приводит к снижению усилия обжатия и появлению зазоров. В результате повышается риск разгерметизации.

Температурная нагрузка во фланцевом соединении определяется не только рабочей температурой, но и соотношением коэффициентов линейного расширения материалов фланцев, болтов и прокладки. Чем больше различие между термомеханическими свойствами материалов, тем выше вероятность возникновения дополнительных напряжений в соединении.

Для снижения вредного влияния температурных деформаций необходимо выбирать такие материалы и конструкции прокладок, которые обеспечивают компенсацию возникающих расширений. Одним из способов решения данной задачи является применение комбинированной прокладки. В такой конструкции часть прокладки выполняется из традиционного уплотнительного материала, а дополнительный компенсирующий элемент – из материала с меньшим коэффициентом линейного расширения. При нагреве такой элемент ограничивает чрезмерное расширение прокладки и снижает дополнительную нагрузку на фланцы и болты.

Выбор материала прокладки является одним из ключевых этапов при разработке фланцевого соединения, работающего в условиях повышенных температур. Материал должен обеспечивать герметичность, сохранять форму при нагреве, обладать достаточной химической стойкостью и не вызывать чрезмерного роста нагрузки в соединении.

Винилпласт обладает достаточно высокой химической стойкостью и может применяться в контакте с различными рабочими средами. Однако его коэффициент линейного термического расширения значительно выше, чем у стали. При нагреве винилпластовая прокладка стремится увеличиться в размерах, что может привести к росту распирающих усилий между фланцами. Кроме того, при длительном нагружении возможна ползучесть материала, что ухудшает стабильность соединения.

Эластомерные материалы обладают хорошей упругостью и способны обеспечивать плотное прилегание к поверхностям фланцев. Однако их существенным недостатком является высокий коэффициент линейного рас-

ширения. При повышении температуры такие материалы значительно изменяют размеры, а при циклическом нагреве и охлаждении могут терять первоначальную форму. Это делает их менее надёжными для соединений, работающих при высоких температурах.

Паронит и безасбестовые листовые материалы применяются в промышленности достаточно широко. Они обладают большей термостойкостью по сравнению с эластомерными материалами, однако также имеют коэффициент расширения выше, чем у стали. При стабильных температурных условиях такие материалы могут работать удовлетворительно, но при частых перепадах температуры существует риск потери герметичности.

Композиционные материалы обладают высокой химической стойкостью. Это делает их перспективными для применения в агрессивных средах. Однако даже наполненные материалы могут иметь достаточно высокий коэффициент линейного термического расширения, поэтому при проектировании соединения необходимо учитывать возможность температурных деформаций.

Графитовые материалы отличаются низким коэффициентом линейного расширения и высокой термостойкостью. Благодаря этому они более стабильны при нагреве и меньше способствуют возникновению дополнительных термических нагрузок. Однако применение графита может быть ограничено стоимостью, особенностями механической прочности и требованиями к условиям эксплуатации.

На основании анализа можно сделать вывод, что универсального материала прокладки не существует. Для повышения надёжности фланцевого соединения целесообразно использовать комбинированный подход, при котором уплотнительные свойства одного материала сочетаются с термостабильностью другого. Именно такой принцип положен в основу разработки комбинированной термокомпенсирующей прокладки.

В рамках работы была рассмотрена конструкция комбинированной прокладки, предназначенной для снижения дополнительной термической нагрузки во фланцевом соединении. Основная идея конструкции заключается в том, что прокладка включает не только уплотнительный материал, но и компенсирующий элемент из материала с пониженным коэффициентом линейного расширения.

В качестве основного уплотнительного материала рассматривался паронит. Данный материал широко применяется в промышленности для изготовления прокладок, обладает достаточной термостойкостью и способен обеспечивать герметичность соединения. Однако коэффициент линейного термического расширения паронита выше, чем у металлических элементов фланцевого соединения, поэтому при нагреве он может создавать дополнительную нагрузку.

Для компенсации температурного расширения паронитовой части прокладки был использован элемент из простого стекла. Стекло имеет значи-

тельно меньший коэффициент линейного расширения по сравнению с паронитом и большинством полимерных материалов, поэтому его применение позволяет уменьшить рост нагрузки при нагреве.

Комбинированная прокладка работает следующим образом. При повышении температуры паронитовая часть прокладки стремится расшириться. Однако компенсирующий элемент из материала с меньшим коэффициентом расширения ограничивает это увеличение размеров. В результате уменьшается дополнительное воздействие прокладки на фланцы и болтовое соединение. Это позволяет сохранить более стабильное усилие обжатия и снизить риск разгерметизации.

Такой подход особенно важен для соединений, работающих при повышенных температурах и в условиях повторяющихся циклов нагрева и охлаждения. В отличие от обычной прокладки, комбинированная конструкция позволяет учитывать не только герметизирующие свойства материала, но и его термомеханическое поведение.

Для оценки эффективности предложенной конструкции были проведены экспериментальные исследования на модели фланцевого соединения. Испытания были направлены на определение изменения нагрузки в болтовом соединении при нагреве.

В ходе эксперимента сравнивались три варианта соединения: соединение без прокладки, соединение с паронитовой прокладкой и соединение с комбинированной прокладкой, включающей компенсирующее кольцо из простого стекла. Толщина паронитовой прокладки составляла $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ м, а толщина компенсирующего стеклянного элемента – $4 \cdot 10^{-3}$ м.

Перед началом испытаний соединение затягивалось с моментом затяжки, формирующим усилие 5 кН на болте. После затяжки модель помещалась в термошкаф, где температура постепенно повышалась от 0 до 150 °C.

Изменение нагрузки в болтовом соединении фиксировалось с помощью трёх тензометрических датчиков, расположенных под углом 120° друг к другу. Сигнал от датчиков передавался через приёмник и усилитель на компьютер. Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения ZetLab.

Такая методика позволила получить зависимость изменения нагрузки в болте от температуры и сравнить работу разных вариантов прокладок в одинаковых условиях испытаний.

Результаты экспериментальных исследований показали, что нагрев фланцевого соединения приводит к изменению нагрузки в болтовом соединении. Это подтверждает, что температурное расширение элементов конструкции оказывает существенное влияние на работу соединения.

В соединении без прокладки изменение нагрузки связано преимущественно с тепловым расширением металлических элементов. Поскольку фланцы и болты имеют близкие термомеханические характеристики, рост

дополнительной нагрузки в таком случае выражен менее значительно. Однако даже в данном варианте температурное воздействие приводит к изменению напряжённого состояния соединения, что необходимо учитывать при расчётах.

При использовании паронитовой прокладки наблюдается увеличение нагрузки при нагреве. Это объясняется тем, что коэффициент линейного термического расширения паронита выше, чем у металлических элементов фланцевого соединения. При повышении температуры прокладка стремится увеличиться в размерах, однако из-за зажатого положения между фланцами её расширение ограничено. В результате возникает дополнительное распирающее усилие, которое передаётся на фланцы и болтовое соединение.

Такой эффект особенно опасен при длительной эксплуатации оборудования и при циклическом изменении температуры. При многократном нагреве и охлаждении возможно изменение структуры прокладочного материала, снижение его упругих свойств и появление остаточных деформаций. Это может привести к уменьшению усилия обжатия после охлаждения и возникновению микрозазоров между контактными поверхностями.

Применение комбинированной прокладки с компенсирующим стеклянным элементом позволило снизить рост дополнительной нагрузки. Это связано с тем, что стекло имеет меньший коэффициент линейного расширения и частично компенсирует температурное расширение паронитовой части прокладки. Благодаря этому нагрузка в соединении изменяется более плавно, а риск нарушения герметичности снижается.

По результатам экспериментальных данных установлено, что применение комбинированной прокладки позволило снизить дополнительную термическую нагрузку примерно на 20–30% по сравнению с паронитовой прокладкой в зависимости от температуры нагрева. Наибольший эффект проявляется при повышенных температурах, когда различие коэффициентов линейного расширения материалов оказывает наиболее заметное влияние на работу соединения.

Полученные результаты подтверждают, что выбор материала прокладки должен основываться не только на её уплотнительных свойствах, но и на анализе термомеханических характеристик. Особенно важным параметром является коэффициент линейного термического расширения. Чем больше разница между коэффициентами расширения прокладки и металлических элементов соединения, тем выше вероятность возникновения дополнительных температурных напряжений.

Таким образом, комбинированные прокладки можно рассматривать как перспективное направление в разработке уплотнительных элементов для оборудования, работающего при повышенных температурах. Их применение позволяет повысить стабильность фланцевого соединения, уменьшить вероятность утечек рабочей среды и снизить нагрузку на крепёжные элементы.

Разработанная конструкция термокомпенсирующей прокладки может быть использована в промышленном оборудовании, где фланцевые соединения работают в условиях нагрева и перепадов температуры. К таким объектам относятся трубопроводы химических производств, теплообменное оборудование, энергетические установки, аппараты, работающие с горячими жидкостями и газами.

Главное преимущество предложенного решения заключается в том, что повышение надёжности соединения достигается без серьёзного изменения конструкции фланцевого узла. Комбинированная прокладка может быть установлена вместо традиционной прокладки, что снижает затраты на модернизацию оборудования.

Использование таких прокладок позволяет уменьшить вероятность утечек рабочей среды, снизить риск аварийных ситуаций, сократить расходы на ремонт и обслуживание оборудования, а также повысить экологическую безопасность промышленных процессов.

В ходе работы была рассмотрена проблема нарушения герметичности фланцевых соединений при воздействии повышенных температур. Установлено, что одной из причин снижения надёжности соединения является различие коэффициентов линейного термического расширения материалов фланцев, болтов и прокладки.

Показано, что традиционные полимерные, композиционные и листовые прокладочные материалы при нагреве могут создавать дополнительные распирающие нагрузки, так как их коэффициент линейного расширения выше, чем у металлических элементов соединения. Это может приводить к деформации прокладки, изменению усилия затяжки и последующей разгерметизации.

Предложено использовать комбинированную термокомпенсирующую прокладку, включающую уплотнительный материал и компенсирующий элемент из материала с меньшим коэффициентом линейного расширения. На примере прокладки с паронитовой частью и стеклянным компенсирующим элементом показана возможность снижения дополнительной термической нагрузки.

Экспериментальные исследования, проведённые с моментом затяжки, формирующим усилие 5 кН на болте, и нагревом от 0 до 150 °C, подтвердили эффективность предложенного подхода. Комбинированная прокладка показала более стабильное поведение при нагреве по сравнению с традиционной паронитовой прокладкой.

Установлено, что применение комбинированной прокладки позволяет снизить дополнительную термическую нагрузку примерно на 20–30% по сравнению с паронитовой прокладкой в зависимости от температуры нагрева. Это подтверждает перспективность применения комбинированных материалов для повышения надёжности фланцевых соединений.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения комбинированных термокомпенсирующих прокладок в промышленном оборудовании, работающем при повышенных температурах. Такое решение может повысить надёжность фланцевых соединений, снизить вероятность утечек и уменьшить затраты на обслуживание оборудования.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных материалов и конструкций уплотнительных элементов для химической, энергетической, нефтегазовой и других отраслей промышленности.

Список литературы

1. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования.
2. ГОСТ 34233.4-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчёт на прочность и герметичность фланцевых соединений.
3. Божко Г.В. Разъёмные герметичные соединения // Вестник ТГТУ. 2010, Т. 16. № 2. С. 404–420,
4. Продан В.Д., Божко Г.В. Герметичность оборудования: учебное пособие. М.: Университет машиностроения, 2014. 109 с.
5. Продан В.Д. Герметичность разъёмных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 280 с.
6. Баскаков, А. П. Влияние повышенной температуры на работу фланцевого соединения с полимерной прокладкой / А. П. Баскаков, А. Е. Юшков // СНК-2025 : Материалы LXXV международной студенческой научной конференции Московского Политеха, Москва, 17 марта – 23 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 668-676. – EDN VEDASF.
7. Таблица коэффициентов линейного расширения материалов: металлы, стекло, полимеры // Inner.su.
8. Патент РФ RU 154210 U1. Фланцевое соединение с комбинированной прокладкой.
9. Экспериментальное определение осевой силы в крепежных деталях, возникающей при их моментной затяжке / Г. В. Божко, М. С. Фокина, Ж. Д. Нконди [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2024. – Т. 30, № 1. – С. 170–177. – DOI 10, 17277/vestnik.2024.01.pp.170–177. – EDN LJECFB.

Вьялицын Н.С.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
nikita.vialitsyn@yandex.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Аннотация. В статье исследуется влияние внешнего электромагнитного воздействия на структуру и свойства сварных соединений алюминиевых сплавов 1565чМ и В95. Экспериментально показано, что применение электромагнитного перемешивания сварочной ванны приводит к значительному измельчению зеренной структуры и снижению химической неоднородности металла шва, что способствует улучшению его физико-механических свойств. Установлено, что при наложении продольного магнитного поля колебания температуры у фронта кристаллизации приобретают регулярный характер, а их амплитуда возрастает в 2,2–4,3 раза по сравнению с обычной сваркой. Это приводит к чередованию «горячих» и «холодных» полупериодов кристаллизации, ускорению выравнивающей диффузии и уменьшению протяжённости зоны концентрационного переохлаждения. В результате формируются более мелкодисперсные и однородные по составу сварные швы. Механические испытания подтвердили повышение прочности сварных соединений при оптимальных режимах электромагнитного перемешивания: для сплава 1565чМ – при частоте магнитного поля 3 Гц, для сплава В95 – при 6 Гц. Полученные результаты позволяют оптимизировать технологические режимы сварки алюминиевых сплавов с использованием электромагнитного перемешивания для повышения качества и эксплуатационных характеристик сварных конструкций.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварные соединения, электромагнитное перемешивание, структура, свойства, кристаллизация, концентрационное переохлаждение, механические свойства, прочность шва.

Vyalitsyn N.S.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
nikita.vialitsyn@yandex.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC ACTION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF ALUMINUM ALLOYS

Abstract. The article examines the effect of external electromagnetic influence on the structure and properties of welded joints of aluminum alloys 1565chM and B95. It has been experimentally shown that the use of electromagnetic mixing of the weld pool leads to a significant grinding of the grain structure and a decrease in the chemical heterogeneity of the weld metal, which contributes to the improvement of its physical and mechanical properties. It has been established that when a longitudinal magnetic field is superimposed, temperature fluctuations at the crystallization front become regular, and their amplitude increases by 2.2–4.3 times compared to conventional welding. This leads to the alternation of «hot» and «cold» half-periods of crystallization, acceleration of leveling diffusion and a decrease in the length of the concentration subcooling zone. As a result, more finely dispersed and homogeneous welds are formed. Mechanical tests have confirmed an increase in the strength of welded joints under optimal modes of electromagnetic mixing: for alloy 1565chM – at a magnetic field frequency of 3 Hz, for alloy B95 – at 6 Hz. The results obtained make it possible to optimize the technological modes of welding aluminum alloys using electromagnetic stirring to improve the quality and performance characteristics of welded structures.

Keywords: aluminum alloys, welded joints, electromagnetic mixing, structure, properties, crystallization, concentration subcooling, mechanical properties, seam strength.

Особенностью швов, полученных при использовании электромагнитного перемешивания, является резкое измельчение зеренной структуры и снижение химической неоднородности, что способствует улучшению качества соединений. Улучшение структурных и физико-механических свойств металла швов при неизменном общем химическом составе и минимальном влиянии параметров управляющего магнитного поля на геометрию расплава указывает на прямое воздействие состояния расплава во время перемешивания на термоконцентрационные процессы, определяющие кинетику кристаллизации. С учетом подобного эффекта можно оптимизировать режимы принудительного перемешивания и повысить эффективность применения данного метода.

Воздействие концентрационного переохлаждения у границы кристаллизации сварочной ванны позволяет влиять на скорость отверждения алюминиевых сплавов и определять их структуру с физико-механическими характеристиками. Размеры зоны такого переохлаждения в первую очередь обусловлены температурным градиентом в расплаве непосредственно перед фронтом кристаллизации. Специфика процессов переноса массы и тепла при реверсивном электромагнитном перемешивании способна привести к существенной трансформации указанного градиента. С целью экспериментальной проверки данной гипотезы производилась фиксация температуры расплавленного металла термопарами, размещенными на расстоянии 1–1,5 мм от фронта кристаллизации в различных точках.

Отработка технологии сварки осуществлялась на пластинах из алюминиевых сплавов 1565чМ и В95 толщиной 3 мм и размерами 150х100 мм.

Сварку осуществляли без присадочной проволоки от источника питания переменного тока. Автоматическая сварка в защитной атмосфере аргона неплавящимся вольфрамовым электродом выполнялась сварочной головкой ГСУ-9 с использованием стандартных горелок. Перемешивание сварочной ванны обеспечивалось продольным магнитным полем, создаваемым соплом с установленным на нем соленоидом и источником тока до 3 А, работающим в импульсном режиме (рис. 1). Были опробованы два способа перемешивания металла сварочной ванны: с помощью магнитного поля, создаваемого постоянным током, и магнитного поля, создаваемого переменным током.

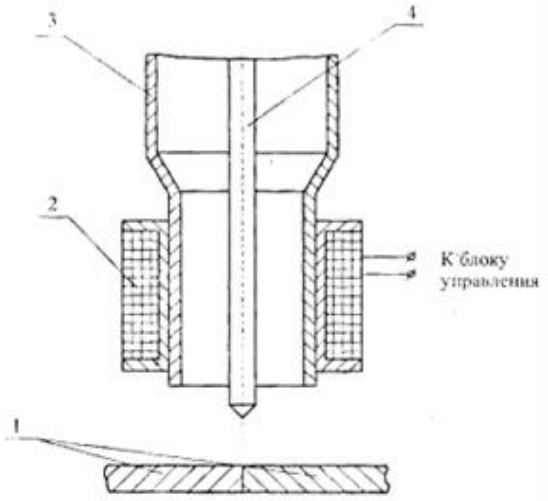


Рис. 1. Схема установки соленоида на сопло сварочной головки:
1 – свариваемые заготовки; 2 – соленоид; 3 – сопло горелки; 4 – электрод

Опыты по определению температуры нагрева металла на фронте кристаллизации проводили на установке (рис. 2), обеспечивающей возможность визуального наблюдения за фронтом кристаллизации через окуляр 1 микроскопа типа МБС-9 при увеличении 25. Термопары погружали через продольную прорезь в стеклянной крышке газозащитной камеры при помощи специального устройства 4, позволяющего в процессе сварки фиксировать положение спая термопары относительно фронта кристаллизации. Действительное положение спая термопары контролировали в каждом опыте по результатам микровидеосъемки области погружения термопары со спаем диаметром 0,3 мм. В предположении линейного закона распределения температуры в расплавленном металле сварочной ванны в направлении нормали к фронту кристаллизации рассчитывали градиент по формуле

$$G= T_ф−T_{кр}rG= T_ф−T_{кр}r$$

где $T_ф$ – фактическая температура жидкого металла в контролируемой точке (по данным осциллографирования);
$T_{кр}$ – температура кристаллизации (определялась в момент фиксирования термопары при соприкосновении ее с фронтом кристаллизации);
r – расстояние между спаем термопары и фронтом кристаллизации.

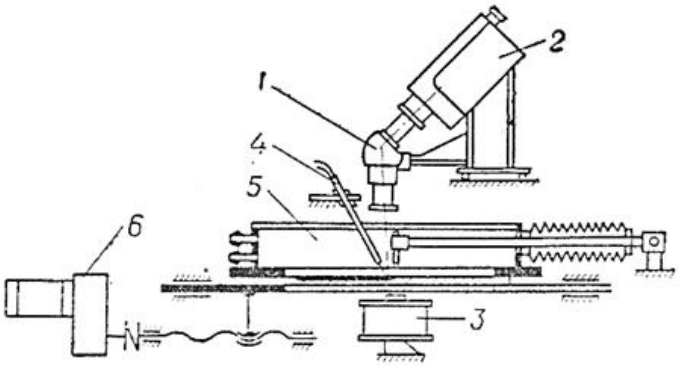


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – окуляр микроскопа; 2 – видеокамера; 3 – электромагнит ввода поля;
4 – устройство погружения термопар; 5 – газозащитная камера с введенным электрододержателем; 6 – привод

Сварку пластин алюминиевых сплавов осуществляли вольфрамовым электродом в атмосфере аргона на режиме: $I_{св}$ = 100–110 А; $U_д$ = 22 В, $v_{св}$ = 11 м/ч, индукция управляющего магнитного поля B = 20 мТ; интервал его реверсирования $t_р$ = 0,2 с, частота магнитного поля f = 3 и 6 Гц.

Эксперименты продемонстрировали, что при сварке с электромагнитным перемешиванием колебания температуры у фронта кристаллизации приобретают регулярный характер, а их амплитуда возрастает в 2,2–4,3 раза по сравнению с обычными условиями сварки.

Сравнение данных термопар с результатами видеосъемки поверхности сварочной ванны подтверждает, что колебания температуры у фронта кристаллизации связаны с периодическим (с частотой переключения магнитного поля) поступлением порций перегретого жидкого металла из передней части ванны в заднюю вдоль одной из свариваемых кромок. Такая зависимость позволяет условно выделить в процессе кристаллизации чередующиеся горячие и холодные полупериоды [1].

В горячий полупериод к фронту кристаллизации поступает перегретый жидкий металл, что приводит к увеличению температурного градиента у фронта по сравнению с обычными условиями сварки (рис. 3). В зависимости от величины этого градиента на различных участках ванны скорость перемещения фронта снижается, возможна его остановка или даже обратное движение, сопровождающееся последующим оплавлением растущих кристаллитов.

Увеличение градиента температур ускоряет отвод тепла в основной металл и сварной шов, способствуя реализации процессов выравнивающей диффузии. Обтекание поверхности кристаллизации в горячий полупериод перегретым жидким металлом на участках ванны, примыкающих к её головной части, а также рост температурного градиента у фронта в хвостовой зоне ванны приводит к уменьшению толщины двухфазной зоны и способствует сокращению протяжённости области концентрационного переохлаждения.

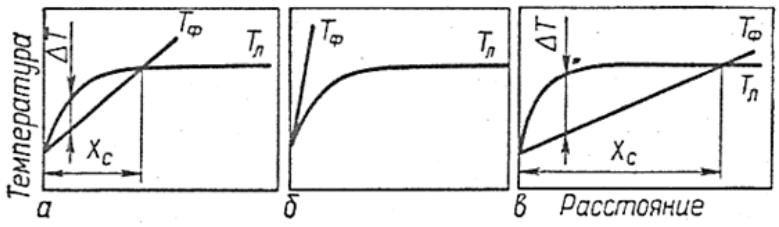


Рис. 3. Параметры зоны концентрационного переохлаждения при сварке: а – без электромагнитного перемешивания; б, в – с перемешиванием в горячий и холодный полупериоды соответственно (Тф – фактическое распределение температуры у фронта кристаллизации; Тл – эффективный ликвидус)

При наступлении холодного полупериода кристаллизации, последовавшего после смены направления движущих электромагнитных сил в расплаве и прекращения подачи порций перегретого металла к фронту кристаллизации, градиент температуры уменьшается до уровней, значительно меньших, чем при сварке без перемешивания. В таких условиях неизбежно возрастает протяжённость зоны концентрационного переохлаждения, что приводит к неустойчивости кристаллизующейся системы. В результате в ней активизируются процессы, снижающие переохлаждение – например, увеличивающие удельную длину границ кристаллитов и ускоряющие сам процесс кристаллизации [2]. Именно этим обусловлено измельчение первичной структуры при обычной сварке и при использовании электромагнитного перемешивания.

На рис. 4 представлены установленные в экспериментах пределы изменения градиента температур у фронта кристаллизации при обычной сварке и при сварке с использованием магнитного перемешивания.

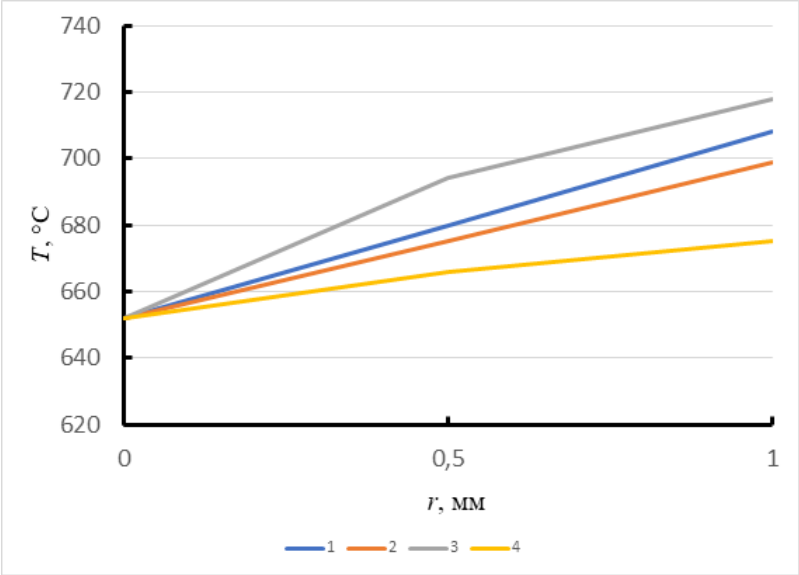


Рис. 4. Пределы изменений температуры перед фронтом кристаллизации при сварке сплава 1565чМ без электромагнитного перемешивания (1, 2) и с электромагнитным перемешиванием (3, 4)

Анализ видеозаписи выявил, что фронт кристаллизации смещается между двумя последовательными остановками на расстояние 0,2…0,5 мм, что превышает толщину слоя концентрационного переохлаждения на 2–3 порядка. Тем не менее, в ходе экспериментов зародыши перед фронтом кристаллизации не зафиксированы. Обнаруженные в работе [3] участки, интерпретировавшиеся как зародыши, на деле являются вершинами ячеек или дендритов, возникающими периодически при колебаниях сварочной ванны во время процесса перемешивания.

Увеличение скорости кристаллизации при сварке с электромагнитным перемешиванием снижает уровень химической неоднородности образовавшегося металла. Это обусловлено усиленным проникновением примесей в центральные зоны дендритов при ускоренном движении их фронтов, а также уменьшением концентрации посторонних элементов в межосных зазорах из-за неполной реализации диффузионных процессов у границы кристаллизации.

Снижение химической неоднородности металла шва при сварке с перемешиванием обусловливает повторное плавление кристаллитов на начальном этапе кристаллизации, а также ускорение процесса выравнивающей диффузии за счёт периодического повышения градиента температур на границе твердой и жидкой фаз.

Основные стадии кристаллизации, определяющие особенности формирования структуры при сварке с магнитным перемешиванием алюминиевых сплавов, показаны на рис. 5.

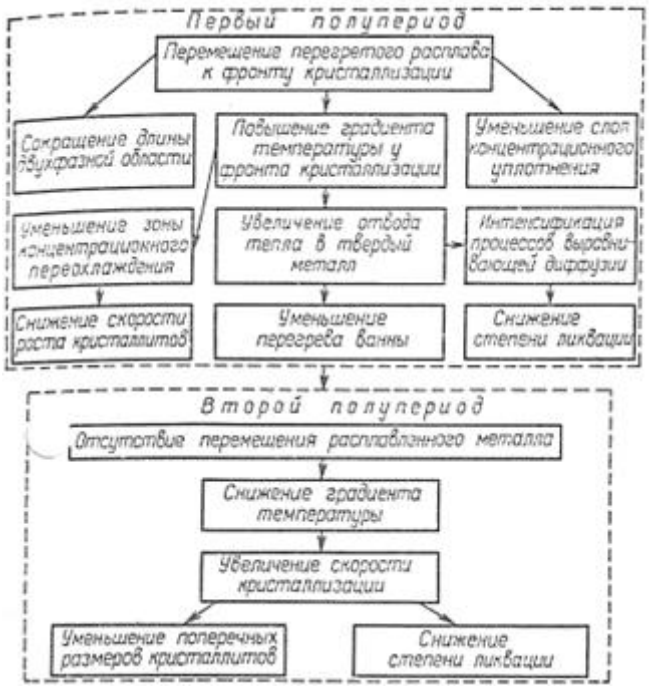
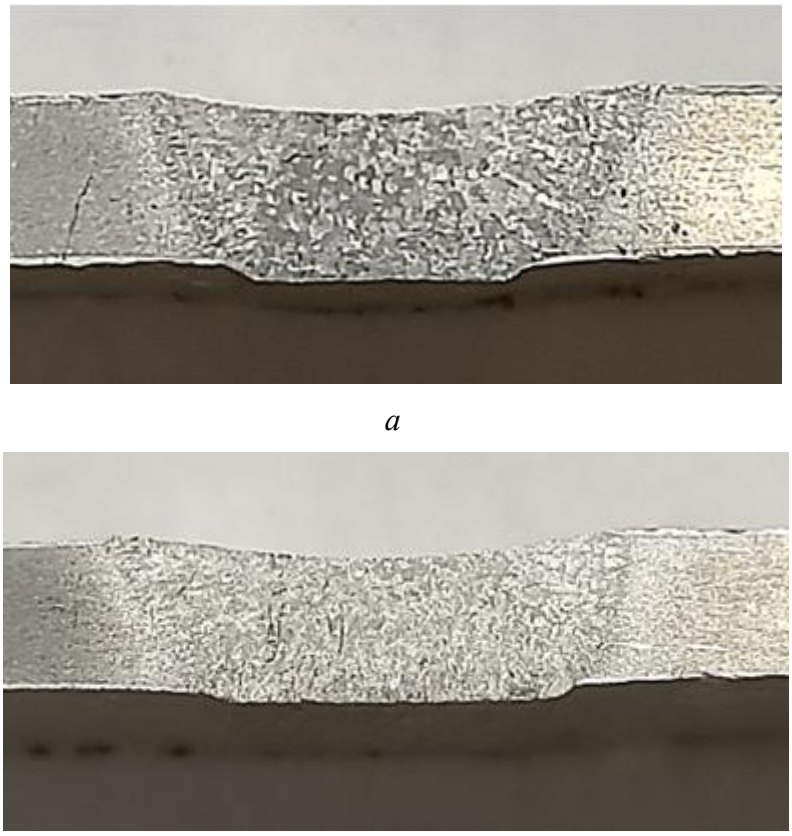


Рис. 5. Основные процессы, определяющие структуру металла сварного шва при сварке алюминиевых сплавов с магнитным перемешиванием

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что сварные швы приобретают наиболее мелкодисперсную структуру и минимальную химическую неоднородность при использовании режимов перемешивания ванны, гарантирующих наивысшие мгновенные скорости кристаллизации по всей площади межфазной границы.

На рисунке 6 приведены макроструктуры сварных швов сплава 1565чМ, выполненных без и с магнитным перемешиванием сварочной ванны.



а

б

Рис. 6. Макроструктура сварных швов сплава 1565чМ, выполненных без присадочной проволоки без (а) и магнитным перемешиванием (б) сварочной ванны

Механические свойства сварных соединений сплавов 1565чМ и В95 приведены в таблице. Анализ данных таблицы показывает, что для исследуемых сплавов наблюдается повышение прочности сварных соединений при использовании электромагнитного перемешивания сварочной ванны. Так для сплава 1565чМ наиболее высокая прочность сварного соединения наблюдается при частоте магнитного поля 3 Гц, в то время как для сплава В95 при частоте 6 Гц.

Таблица

Механические свойства соединений алюминиевых сплавов 1565чМ и В95

Марка сплава	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, МПа		
	Частота магнитного поля *f*, Гц		
	0	3	6
1565чМ	316,3	314,7	332,4
В95	263,5	308,1	250,9
Примечание: приведены средние данные по результатам испытаний 10 образцов на вариант.			

При сварке с электромагнитным перемешиванием наблюдается измельчение структуры и уменьшение химической неоднородности металла шва за счёт периодического (с частотой переключения управляющего магнитного поля) ослабления градиента температур у фронта кристаллизации, что способствует повышению мгновенной скорости продвижения зоны кристаллизации по сравнению с режимом без перемешивания.

Исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Наукоемкие технологии в машиностроении» Московского политехнического университета.

Список литературы

1. Абралов М.А. Особенности кристаллизации металла сварочной ванны в условиях электромагнитного перемешивания. // Автоматическая сварка. 1977. – №3. – С.23–25.

2. Абралов М. А., Абдурахманов Р. У., Йулдашев А. Т. Влияние электромагнитного воздействия на свойства и структуру сварных соединений сплава 01420 // Автоматическая. сварка. – 1977. – № 5. – С. 21–24.

3. Чаюн А. Г., Сыроватка В. В., Матяш В. И. Дуговая сварка алюминиевого сплава 01420 с применением электромагнитного перемешивания // Автоматическая сварка. – 1981. – № 6. – С. 19–21.

Богуш Д.М.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
den.bogush@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТА НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ НЕРАЗЪЕМНОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТОДОМ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. В статье рассматривается влияние геометрических параметров инструмента на процесс образования неразъёмного соединения методом сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминиевых сплавов, в том числе с добавками кальция. Особое внимание уделено таким параметрам, как угол внутреннего поднутрения заплечика, длина наконечника инструмента и наличие резьбовой канавки на его поверхности. Экспериментально установлено, что оптимизация этих характеристик позволяет существенно повысить качество сварных швов, минимизировать образование дефектов (грат, несплавление, зоны недостаточной пластификации) и обеспечить равномерное перемешивание материала. Определены оптимальные соотношения длины наконечника к толщине свариваемого материала (90–95%) и значения угла внутреннего поднутрения (4°), при которых достигается наиболее эффективное формирование бездефектного соединения. Результаты исследования подчёркивают критическую значимость индивидуального подбора геометрических параметров инструмента для различных алюминиевых сплавов и толщин заготовок, что подтверждается анализом экспериментальных данных и трёхмерным сканированием сварных швов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, геометрические параметры инструмента, угол внутреннего поднутрения, длина наконечника, резьбовая канавка, качество сварного шва, дефекты сварных соединений, пластическая деформация, оптимизация технологических параметров.

Bogush D.M.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
den.bogush@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

THE IMPACT OF TOOL GEOMETRIC PARAMETERS ON THE FORMATION OF A PERMANENT JOINT VIA FRICTION STIR WELDING

Abstract. The article discusses the influence of geometric parameters of the tool on the process of formation of a non-separable joint by friction stir welding (SHW) of aluminum alloys, including those with calcium additives. Particular attention is paid to such parameters as the angle of the inner undercut of the shoulder, the length of the tool tip and the presence of a threaded groove on its surface. It has been experimentally established that the optimization of these characteristics can significantly improve the quality of welds, minimize the formation of defects (grating, non-fusion, zones of insufficient plasticization) and ensure uniform mixing of the material. The optimal ratio of tip length to the thickness of the welded material (90–95%) and the values of the angle of internal undercut (4°) are determined, at which the most effective formation of a defect-free joint is achieved. The results of the study emphasize the critical importance of individual selection of tool geometries for various aluminum alloys and workpiece thicknesses, which is confirmed by the analysis of experimental data and three-dimensional scanning of welds.

Keywords: Friction stir welding, aluminum alloys, tool geometry, internal undercut angle, tip length, threaded groove, weld quality, weld defects, plastic deformation, optimization of process parameters.

Алюминиевые термически упрочняемые сплавы обладают низкой плотностью при высокой и средней прочности (жёсткости), хорошей коррозионной стойкостью. Всё это позволяет использовать их как материалы в транспортной (в частности, авиационной) промышленности. При этом зачастую возникает необходимость создавать неразъемные конструкции из материалов различных систем легирования. Однако их низкая свариваемость традиционными методами (аргонно-дуговым или электронно-лучевым) вызывает ограничения. Поэтому относительно новый метод – сварка трением с перемешиванием (СТП) рассматривается как перспективный [1, 2].

Процесс сварки трением с перемешиванием (СТП) базируется на явлении механического перемешивания металла инструментом при его поступательном движении вдоль линии сварного шва. В ходе данного процесса в обрабатываемой заготовке наблюдается повышение температуры, способствующее реализации сварочного процесса. Существенное влияние на его эффективность оказывают также геометрические параметры сварочного инструмента, в частности:

- угол внутреннего поднутрения заплечика;
- длина наконечника инструмента;
- наличие и конфигурация винтовой резьбы на поверхности наконечника (рис. 1).

Целью проведённого исследования является установление оптимальных зависимостей между параметрами сварочного инструмента (l_2 – длины наконечника, а – угол внутреннего поднутрения запленичка) и качеством формирования соединения при сварке стыковых соединений алюминиевых сплавов.

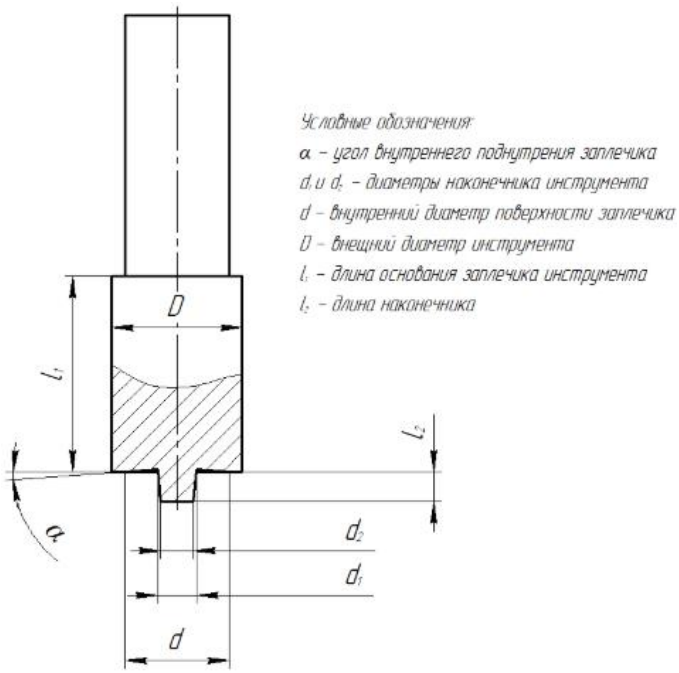


Рис. 1. Эскиз инструмента для СТП и его геометрические характеристики

Условия пластического деформирования металла в зоне формирования неразъёмного соединения определяются двумя ключевыми параметрами: температурой нагрева и скоростью деформирования. Эти параметры, в свою очередь, зависят от частоты вращения сварочного инструмента и скорости его перемещения вдоль свариваемого стыка. Помимо указанных параметров режима и учитывая сложнейший характер пластического течения материалов при СТП, особое значение имеет конструкция сварочного инструмента. Считается, что рост контактной площади поверхности пина инструмента приводит к увеличению объёма захватываемого материала за один оборот, что способствует более эффективному перемешиванию [1, 2]. Оптимизация конструкции сварочного инструмента является сложной научно-практической задачей, требующей тщательного подхода.

Устойчивость процесса формирования швов и качество сварных соединений при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов во многом определяется рядом факторов, включая геометрические характеристики инструмента.

При сварке трением с перемешиванием возможно применение инструментов без наличия и с наличием резьбовой канавки на поверхности стержня сварочного инструмента (рис. 2). Экспериментальные исследования процесса сварки трением с перемешиванием стыковых соединений листов алюминиевого сплава 1565чМ толщиной 5 мм (n = 800 об/мин, S = 115 мм/мин) продемонстрировали положительную динамику сварочного процесса для варианта применения инструмента с резьбовой канавкой на стержне (рис. 2б).

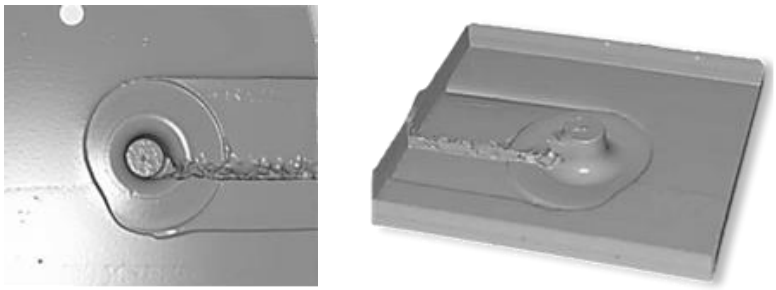


а *б*

Рис. 2. Инструмент для сварки трением с перемешиванием:
а – без резьбовой канавки; б – с резьбовой канавкой

При погружении инструмента без резьбовой канавки в свариваемый материал зафиксировано появление высокочастотного акустического сигнала, сопровождающегося образованием дефекта в зоне сварного шва.

Результаты трёхмерного сканирования образца, обработанного методом сварки трением с перемешиванием инструментом без проточки, продемонстрировали наличие продольного смещения инструмента и формирование протяжённого дефекта в виде несплавления. Такой эффект вызван недостаточным перемешиванием материала в зоне соединения и его механическим переносом вдоль направления движения инструмента (рис. 3).



а *б*

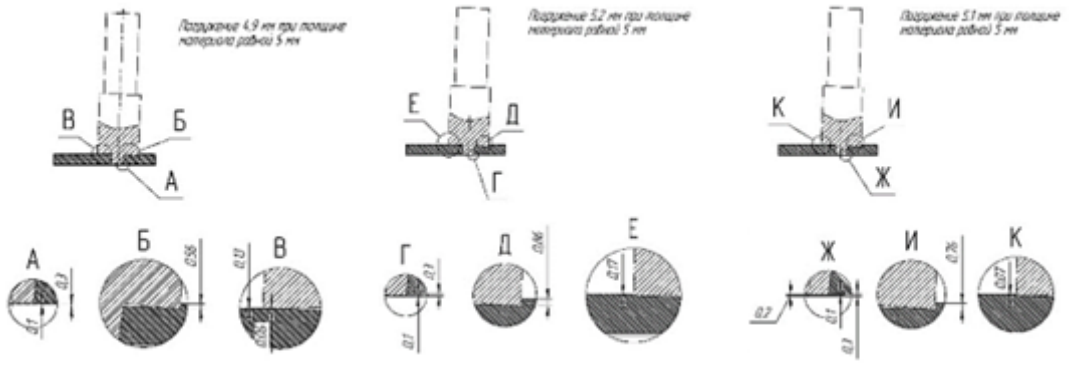
Рис. 3. СТП инструментом без резьбовой канавки:
а – вид 3D сканированной детали сверху; б – вид 3D сканированной детали снизу (внутри)

На поверхности сварного шва зафиксирована протяжённая выпуклость, сконцентрированная вдоль всей его длины. Её присутствие свидетельствует об ограниченной интенсивности процессов перемешивания и переноса материала в зоне формирования соединения (рис. 4).

При изучении факторов, определяющих успешность получения положительного результата при сварке трением с перемешиванием, длина наконечника сварочного инструмента изменялась в пределах от 4,6 мм до 5,0 мм, а толщина образцов для сварки составляла 5 мм.

Экспериментальным путем подтверждено, что наилучшее отношение длины наконечника к толщине свариваемого шва находится в диапазоне от 90 до 95%. Данная пропорция гарантирует наиболее продуктивную реализацию процесса СТП, обеспечивая равномерное перемешивание материала и формирование высококачественного сварного соединения, лишенного дефектов.

На рисунке 4 показано геометрическое обоснование выявленных зависимостей между глубиной погружения инструмента и его конструктивными характеристиками, в первую очередь – длиной наконечника. Подтверждена прямая связь: именно длина наконечника диктует величину погружения, что критически сказывается на термодеформационном режиме в области сварки и на полноте перемешивания материала по всей толщине соединения.



а *б* *в*

Рис. 4. Геометрические процессы при разной глубине погружения инструмента: а – глубина 4,9 мм; б – глубина 5,2 мм; в – глубина 5,1 мм

Ранее было установлено, что оптимальным углом наклона сварочного инструмента при сварке трением с перемешиванием (СТП) является 2˚. При этом в ходе предварительных исследований значимых зависимостей характеристик процесса от угла внутреннего поднутрения α (см. рис. 1) выявлено не было.

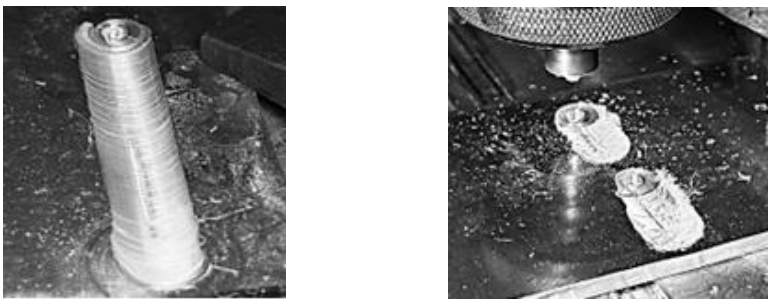
Для тщательного анализа влияния данного параметра на процесс СТП был выбран ряд значений угла внутреннего поднутрения заплечика: 2°, 4°, 6° и 8°.

Одним из основных технологических параметров процесса СТП является угол внутреннего поднутрения заплечика инструмента. Он оказывает прямое воздействие на два сопряжённых процесса: интенсивность тепловыделения в сварочной зоне и объём нагреваемого материала, который при перемещении инструмента транспортируется в область формируемого шва в ходе перемешивания. Неоптимальное значение угла поднутрения ведёт к недостаточному прогреву материала, что снижает пластичность металла в зоне сварки. Как следствие, возникают дефекты сварного соединения, что подтверждается экспериментальными данными (см. рис. 5).

Угол внутреннего поднутрения заплечика инструмента – один из фундаментальных параметров процесса сварки трением с перемешиванием (СТП). Он непосредственно влияет на:

1) объем материала, переходящего в пластическое состояние внутри полости инструмента во время сварки;

2) количество материала, перемещаемого инструментом вдоль формируемого шва при его поступательном перемещении.



а *б*

Рис. 5. Дефект из-за непрогрева в зоне перемешивания: а – локальный дефект; б – протяженные дефекты

Эффективное регулирование этих процессов критично для получения качественного сварного соединения. При неоптимальном угле поднутрения наблюдается недостаточная пластификация материала, что снижает его текучесть в зоне сварки. Как следствие, возникают дефекты соединения, вызванные низкой пластичностью металла в условиях деформации и перемешивания (рис. 6).

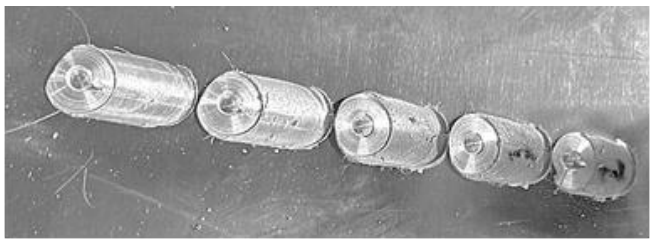


Рис. 6. Влияния разных углов внутреннего поднутрения на объем материала при процессе СТП (от 4 до 10 градусов с шагом в 2 градуса)

На основании проведённых исследований установлено, что оптимальным углом наклона сварочного инструмента при сварке трением с перемешиванием является 4°. При таком угле и правильном подборе длины наконечника обеспечивается равномерное распределение объёма материала, выдавливаемого инструментом в ходе погружения, в зону формирования шва. Такой подход способствует эффективному перемешиванию металла в зоне сварки, формированию однородной структуры соединения и исключает появление характерных дефектов – несплошностей, непроваров и участков недостаточной пластичности.

Экспериментально доказано, что правильный выбор геометрических параметров сварочного инструмента при обработке алюминиевых и магниевых сплавов с учётом толщины заготовки обеспечивает формирование бездефектного соединения при локальном разрыве основного материала в ходе сварки. Это наглядно подчёркивает важность угла внутреннего поднутрения заплечика, длины рабочей зоны наконечника и наличия резьбовой канавки на его поверхности для достижения высокого качества шва. Дополнительное подтверждение этим выводам дают экспериментальные данные, представленные на рисунке 7.



а *б*

Рис. 7. Внешний вид сварного образца (а) и лицевой стороны шва (б) заготовок из сплава системы Al–Ca–Zn–Mg в литом и горячекатанном состояниях

На рис. 7 представлен внешний вид сварного шва, выполненного сваркой трением с перемешиванием заготовок сплава Al–Ca–Zn–Mg в литом и горячедеформированном состоянии.

При формировании шва, когда литая заготовка располагается со стороны набегания рабочего инструмента, наблюдается образование грата небольшой высоты на литой заготовке. Эксперименты также показали, что на формирование шва не оказывало существенного влияние расположение литой заготовки со стороны набегания или отхода рабочего инструмента.

Механические свойства стыковых соединений исследуемых заготовок из сплава системы Al–Ca–Zn–Mg приведены в таблице.

Таблица

Механические свойства соединений сплава Al–Ca–Zn–Mg в сочетании литой заготовки и горячекатаного листа, выполненных СТП

Положение литой заготовки относительно направления вращения инструмента	Предел прочности сварного соединения $\sigma_в$, МПа	Коэффициент прочности K_1 относительно литой заготовки	Коэффициент прочности K_2 относительно горячекатанной заготовки	Зона разрушения сварного соединения	Предел прочности металла шва $\sigma_{шв}\sigma_{Вш}$, МПа	Угол изгиба α, град.
Со стороны набегания	232–247 240	1	0,72	По зоне ЗТМВ со стороны литой заготовки	340–352 345	48–52 50
Со стороны отхода	228–245 235	0,98	0,71		340–352 345	42–48 46

Исследование выполнено в рамках гранта В.Е. Фортова Московского политехнического университета.
Исследования выполнены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Наукоемкие технологии в машиностроении» Московского политехнического университета.

Список литературы

1. Cavaliere P, Nobile R, Panella FW, Squillace A. Mechanical and Microstructural Behavior of 2024-7075 Aluminium Ally Sheets Joined by Friction Stir Welding. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006; №46. P. 588–594.

2. Paidar M, Vignesh RV, Khorram A, Ojo OO, Rasoulpouraghdam A, Pustokhina I. Dissimilar Modified Friction Stir Clinching of AA2024-AA6061 Aluminum Alloys: Effects of Materials Positioning. Journal of Materials Research and Technology. 2020; №9 – P.6037–6047.

Слезко М.Ю.
к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
slezkomy@yandex.ru
Сбитнев А.Г.
к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
artem27@list.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ АРГОНА НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЛАВА 1565Ч

Аннотация. В статье исследуется влияние имплантации ионов аргона (Ar+) на дислокационную структуру и фазовый состав алюминиево-магниевого сплава 1565чН2. Показано, что облучение ионами аргона с энергией 40 кэВ при различных плотностях ионного тока и дозах приводит к формированию развитой ячеистой структуры, уменьшению размеров ячеек и расширению центральных зон, свободных от дислокаций. Установлено, что в результате ионного воздействия происходит растворение интерметаллидов Al_6(Fe, Mn) не только на поверхности, но и на значительной глубине, превышающей проективные пробеги ионов. Трансформация структуры сопровождается сужением границ ячеек, измельчением и исчезновением крупных интерметаллидных включений, что отличает ионную обработку от традиционной термической обработки. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности метода ионной имплантации для целенаправленного модифицирования структуры и свойств термически неупрочняемых алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: ионная имплантация, аргон, алюминиево-магниевый сплав, дислокационная структура, интерметаллиды, микроструктура, фазовый состав, модификация материалов.

Slezko M.Yu.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
slezkomy@yandex.ru
Sbitnev A.G.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow

artem27@list.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

EFFECT OF ARGON ION IMPLANTATION ON DISLOCATION STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF 1565h ALLOY

Abstract. The article investigates the effect of argon ion (Ar+) implantation on the dislocation structure and phase composition of the aluminum-magnesium alloy 1565chH2. It has been shown that irradiation with argon ions with an energy of 40 keV at different ion current densities and doses leads to the formation of a developed cellular structure, a decrease in cell sizes, and an expansion of the central dislocation-free zones. It has been established that as a result of ionic action, intermetallides Al_6(Fe, Mn) are dissolved not only on the surface, but also at a considerable depth exceeding the projective passages of ions. The transformation of the structure is accompanied by a narrowing of the cell boundaries, grinding and disappearance of large intermetallic inclusions, which distinguishes ion treatment from traditional heat treatment. The results obtained indicate the prospects of the ion implantation method for purposeful modification of the structure and properties of thermally unstrengthened aluminum alloys.

Keywords: ion implantation, argon, aluminum-magnesium alloy, dislocation structure, intermetallides, microstructure, phase composition, material modification.

Значение алюминиевых сплавов в качестве конструкционных материалов для современного технического оснащения неуклонно растет. Это утверждение справедливо для подавляющего большинства отраслей промышленности, включая сферы, ориентированные на развитие энергоэффективных и высокотехнологичных решений, а также на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду [1, 2].

Помимо традиционных подходов, таких как пластическое деформирование, а также термическая и термомеханическая обработка, для повышения физико-механических характеристик алюминиевых сплавов всё шире внедряются инновационные способы внешнего воздействия. Подобные методы дают возможность управлять процессами распада пересыщенного твердого раствора, формировать специфическую дефектную структуру и модифицировать состояние межфазных границ. К числу таких технологий относятся высокое статическое давление, закалка из расплава, ультразвуковая деформация [3], а также применение концентрированных потоков энергии, включающих плазменные потоки, СВЧ-излучение и пучки заряженных частиц, в частности ионные пучки [4–6].

Согласно данным, полученным в ходе научных изысканий за последние десять лет, применение ионных пучков считается одним из самых многообещающих направлений в современных технологиях обработки материалов.

В рамках данного исследования объектом изучения выступил алюминиево-магниевый сплав 1565ч. Этот материал относится к категории сплавов, не поддающихся упрочнению посредством термической обработки, хотя растворимость магния в алюминии демонстрирует выраженную температурную зависимость [7].

Сплав 1565ч выделяется как наиболее прочный представитель группы термически неупрочняемых алюминиевых сплавов [2]. Однако для систем Al–Mg характерен относительно невысокий предел текучести. Для устранения этого недостатка и повышения показателя прочности сплавы АМг5 и АМг6 подвергаются холодной деформации в диапазоне 20–30% [7]. Именно холодная нагартовка выступает ключевым методом повышения прочностных свойств сплавов данной системы легирования.

В рамках данной работы исследования были проведены на образцах размером 15х15х3 мм из листов сплава 1565чН2. Проведено исследование трансформации структуры сплава 1565чН2, подвергнутого облучению пучками аргоновых ионов (Ar+) с энергией 40 кэВ. Эксперимент выполнен в диапазоне плотностей ионного тока от 100 до 400 мкА/см² при дозах облучения 10^{15} и 10^{16} см$^{-2}$.

Режимы обработки приведены в таблице 1. Для облучения образцов использовалась установка для ионной имплантации Московского политехнического университета.

Таблица 1

Параметры облучения образцов нагартованного сплава 1565чН2 при энергии ионов 40 кэВ

Плотность ионного тока, *j*, мкА/см^2	Доза, *D*, ион/см^2	Время облучения, *t*, мин.	Температура образца, *T*, °С
400	$2{,}5\times10^{15}$	1	< 140
200	$1{,}2\times10^{16}$	8	< 170
300	$1{,}2\times10^{16}$	5	< 170
100	$0{,}7\times10^{15}$	1	< 100

Измерение температурного режима мишени во время облучения проводилось с использованием термопары. При этом температура образцов не превышала 170 °С.

Параметры плотности ионного потока и дозы облучения подбирались таким образом, чтобы исключить значительный нагрев образцов во время имплантации, тем самым минимизируя влияние процессов, активируемых теплом.

Анализ структуры облученных образцов проводился с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-200 CX путем получения тонких фольг. Исследование выполнялось в двух плоскостях среза: параллельной и перпендикулярной к поверхности образца.

Для получения фольги из массивных заготовок применяли следующую методику. С помощью электроискровой обработки на станке вырезали тонкие пластины толщиной 0,3 мм. Эти детали ориентировали либо параллельно поверхности образца (со стороны облучения), либо перпендикулярно ей. Последующее механическое утонение до 0,1 мм проводили с использованием наждачной бумаги. Завершающий этап подготовки образцов для электронной просветки (до толщины около 0,1 мкм) осуществляли электролитическим путем. Процесс протекал при напряжении в диапазоне 20–40 В в растворе, состоящем из 23% перхлорной кислоты ($HClO_4$) и 77% ледяной уксусной кислоты (CH_3COOH). Температура электролита поддерживалась на уровне не выше 5 °С.

Электронно-микроскопический анализ исходного нагартованного сплава 1565чН2 выявляет выраженную ячеистую структуру, характеризующуюся широкими границами между отдельными ячейками (рис. 1, *а*).

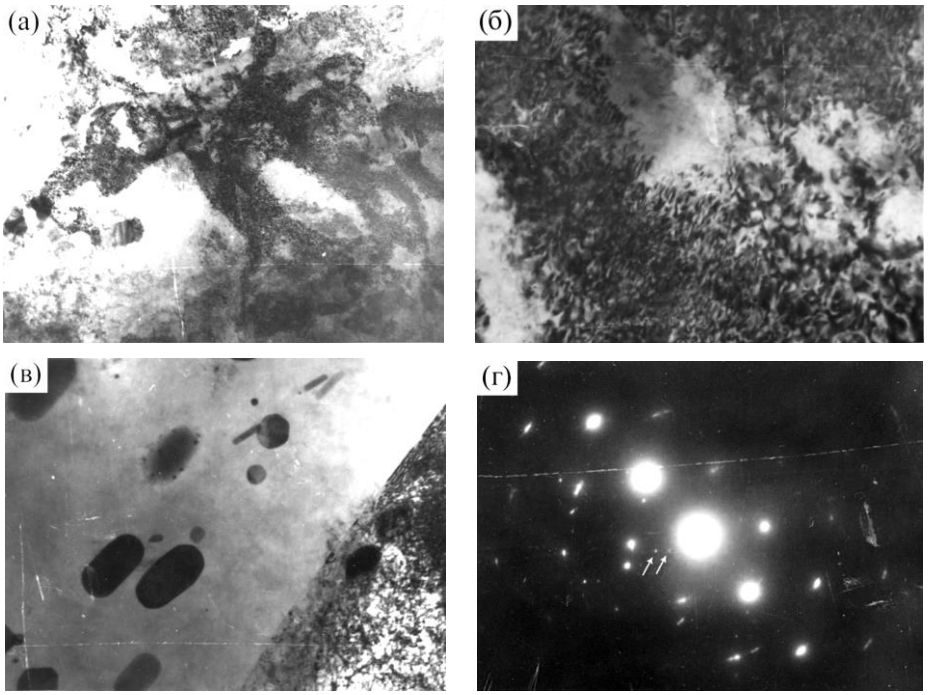


Рис. 1. Микроструктура исходного деформированного сплава 1565чН2:
а – изображение ячеистой структуры; ×15000; б – дислокационная структура границ ячеек; ×75000; в – светлопольное изображение интерметаллидов Al_6 (Fe, Mn); ×30000; г – электронограмма (отмечены рефлексы от интерметаллидов (Fe, Mn)Al_6)

Границы представлены плотными скоплениями дислокаций. На рис. 1, *б* показана структура таких ячеечных границ. Их толщина сопоставима с размерами центральных зон, свободных от дефектов. Наблюдается, что ячейки обладают либо равноосной, либо вытянутой формой. Размер равноосных ячеек варьируется в пределах 1–2 мкм.

Микроструктура сплава характеризуется значительным количеством интерметаллидных частиц, обладающих округлой или эллипсоидальной геометрией со средним размером около 0,4–1,2 мкм (см. рис. 1, *в*). Анализ данных, полученных путем расчета электронограмм (пример одной из них

показан на рис. 1, *г*), позволил идентифицировать химический состав этих включений как Al_6(Fe, Mn).

Отжиг нагартованного сплава 1565чН2 при температуре 320–325 °С в течение одного часа обеспечивает формирование однородной рекристаллизованной структуры. На рисунке 2, *а* показаны равновесные тройные стыки полученных зерен. Их размер превышает 12 мкм, а внутри зерен фиксируется высокая плотность дислокаций.

Как следует из рис. 2, *а*, в структуре отожженного сплава сохраняется значительная доля интерметаллидных фаз, присутствовавших в исходном материале после холодной деформации. Анализ электронно-дифракционных снимков (рис. 2, *в*) подтверждает, что данные включения имеют химический состав Al_6(Fe,Mn). Темнопольное изображение этих интерметаллидов, полученное в отражении основной фазы, представлено на рисунке 2, *б*.



Рис. 2. Микроструктура отожженного сплава 1565ч:
а – изображение тройных стыков рекристаллизованных зерен; ×15000;
б – темнопольное изображение интерметаллидов Al_6(Fe, Mn); ×75000;
в – электронограмма, отмечены рефлексы от интерметаллидов Al6(Fe, Mn)

Анализ микроструктуры образцов, подвергнутых параллельному облучению при дозе $2{,}5\times10^{15}$ см$^{-2}$ и плотности ионного тока 400 мкА/см², выявил формирование развитой ячеистой архитектуры. В целом она напоминает структуру, типичную для деформированного состояния материала. Тем не менее, детальное сравнение структурных особенностей облученных и деформированных образцов позволяет заключить, что в результате воздействия облучения в сплаве происходит заметная трансформация ячеистой сетки.

Основным признаком этого является повышение регулярности структуры (рис. 3, *а*), наряду с уменьшением размеров ячеек (их средняя ширина достигает примерно 0,4 мкм) и существенным расширением центральных участков, свободных от дислокаций, чей диаметр варьируется в пределах от 1,4 до 3,3 мкм.

Также было выявлено, что в облученном сплаве снизилось количество интерметаллидов кристаллизационного происхождения, которые были обнаружены в нем после деформации и отжига. Диаметр интерметаллидов преимущественно составляет 0,12…0,25 мкм (рис. 3, *б*). Незначительное количество интерметаллидов длиной до 0,44 мкм сохранилось только в отдельных участках образца. На основании анализа электронограмм, одна из которых приведена на рис. 3, *в*, установили, что интерметаллиды имеют состав Al_6(Fe, Mn).

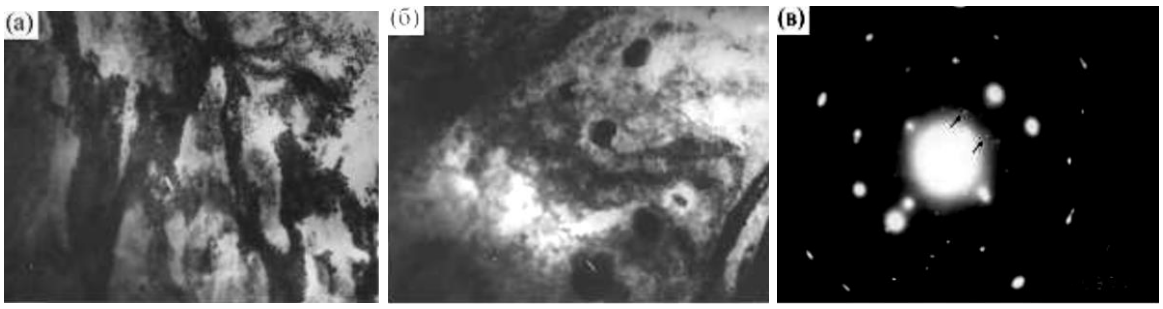


Рис. 3. Микроструктура сплава 1565чН2, облученного ионами Ar+ с E = 40 кэВ, j = 400 мкА/см², D = 2,5×10¹⁵ см⁻²: а – светлопольное изображение ячеистой структуры; ×15000; б – изображение интерметаллидов Al_6(Fe, Mn); ×30000, в) – электронограмма, отмечены рефлексы (112), (021) Al_6(Fe, Mn)

При воздействии облучения дозой 10^{16} см⁻² и плотности ионного тока 200 мкА/см² в исследуемом сплаве формируется неоднородная ячеистая морфология (см. рис. 4, *а*, *б*). Анализ изображений демонстрирует, что ячейки отличаются разнообразием форм, включая как равноосные, так и вытянутые конфигурации. Свободные от дислокаций центральные зоны ячеек имеют диаметр в пределах 1–2 мкм, тогда как ширина их границ варьируется от 0,18 до 1,1 мкм и более.

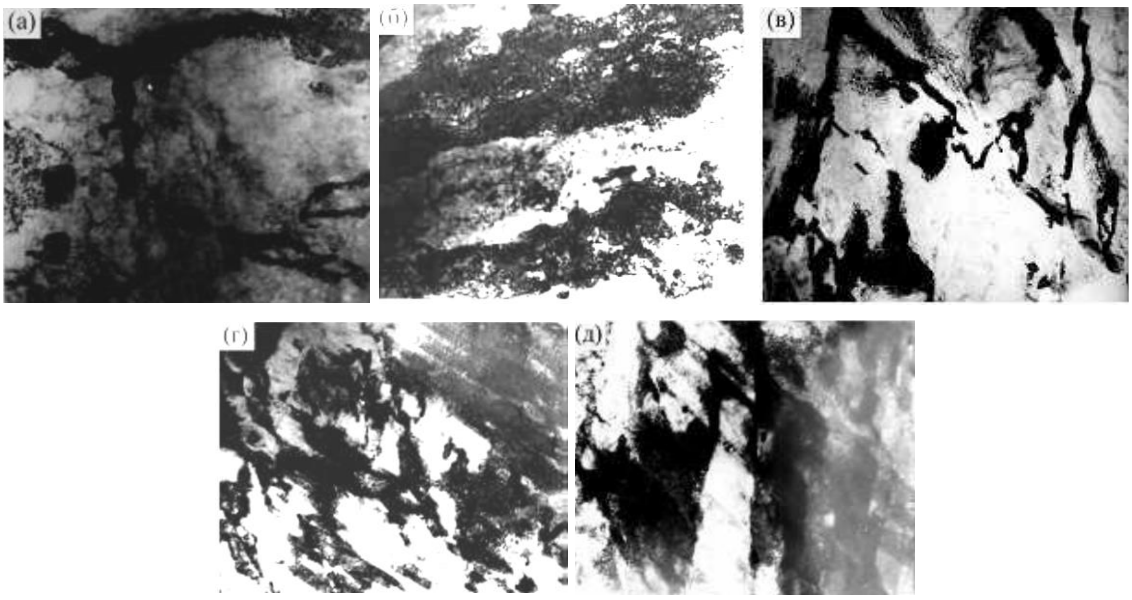


Рис. 4. Морфология ячеистой структуры в материале сплава 1565чН2 после ионного облучения аргоном (Ar+) при энергии 40 кэВ, плотности тока 200 мкА/см² и дозе 10^{16} ион/см². На изображениях а и б представлены продольные срезы, параллельные поверхности облучения (увеличение ×30000); на в, г и д показаны поперечные сечения (увеличение ×15000), полученные в приповерхностной зоне (в), в центре образца (г) и вблизи необработанной поверхности (д)

В результате облучения в исследуемых образцах выявляются интерметаллиды состава Al_6(Fe, Mn). Однако качественный анализ демонстрирует, что их количество снижается по сравнению с деформированным и отожженным состояниями. Средний размер данных частиц находится в диапазоне 0,1–0,45 мкм.

В зонах, граничащих с облученной поверхностью, на поперечных срезах фиксируется равноосная ячеистая морфология (см. рис. 4, *в*). Средний размер центральных участков ячеек, лишенных дислокаций, составляет около 1,8–2 мкм. Границы этих структур, представляющие собой высокоплотные узлы дислокационных переплетений, имеют толщину от 0,25 до 0,53 мкм. По мере углубления внутрь материала от облученного края начинают проявляться полосы скольжения (рис. 4, *г*). В центральной части образца их ширина достигает 0,73 мкм (рис. 4, *д*), тогда как при приближении к необлученной стороне они сужаются до 0,3 мкм. Анализ изображений показывает, что внутри этих полос наблюдаются дислокационные переплетения, которые разделяют их на изолированные блоки.

Облучение нагартованного сплава 1565чн2 дозой 10^{16} см$^{-2}$ при повышенной плотности ионного тока (300 мкА/см²) приводит к сохранению ячеистой структуры (рис. 5, *а*), однако она приобретает большую однородность: хорошо оформленные ячейки прослеживаются почти по всему объему материала. При этом ширина зон, свободных от дислокаций, составляет в среднем 1,8–2 мкм, а толщина границ не превышает 0,4 мкм. Главным отличием этой микроструктуры от полученной при облучении с меньшей плотностью тока (200 мкА/см²) является значительное снижение содержания интерметаллидов, которые в некоторых участках полностью отсутствуют.

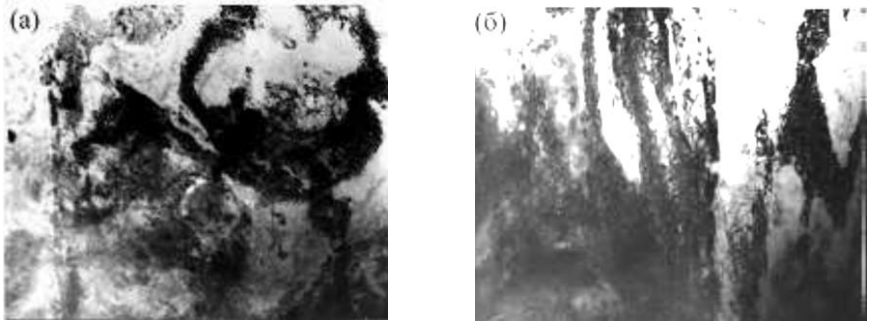


Рис. 5. Изображение ячеистой структуры образца сплава 1565чН2, облученного ионами Ar+, E = 40 кэВ, j = 300 мкА/см², D =10^{16} ион/см²:
а – сечение, параллельное облучаемой поверхности; ×30000; б – поперечное сечение; ×30000

Микроструктура поперечного разреза образца характеризуется наличием вытянутых ячеек (см. рис. 5, *б*). Признаки полос скольжения отсутствуют или выражены слабо. Подобная морфология сохраняется на всей толщине исследуемого материала.

Установлено, что воздействие излучения на сплав 1565чН2 в разных режимах не вызывает кардинальных изменений его дислокационной структуры по сравнению с состоянием после деформации. Заметная трансформация структуры наблюдается исключительно при облучении дозой 10^{16} ион/см² и плотности ионного тока до 300 мкА/см².

Следовательно, облучение нагартованного сплава 1565чН2 ускоренными ионами приводит к возникновению полигональной структуры, напоминающей ту, что появляется при начальном этапе рекристаллизационного отжига. Еще одно существенное отличие структурного состояния сплава 1565ч после термической обработки и после воздействия ионов аргона заключается в том, что в случае облучения полностью отсутствуют крупные интерметаллиды Al_6(Fe, Mn) кристаллизационного происхождения.

Вызывает особый интерес тот факт, что внедрение ионов аргона с указанной энергией инициирует растворение кристаллизационных интерметаллидов Al_6(Mn, Fe) уже при малых дозах облучения, начиная с 10^{15} см$^{-2}$ (что соответствует времени воздействия в 1 минуту). Данный процесс происходит на глубине, которая в десятки тысяч раз превышает проективные пробеги ионов.

Результаты текущего исследования показывают, что интерметаллиды Al_6(Mn, Fe) растворяются под воздействием аргоновых ионов (40 кэВ) при экспозиции 1 и 10 минут, причем температура образцов не превышает 170°С.

Следует подчеркнуть, что под воздействием облучения ускоренными ионами в исследуемом сплаве наблюдается трансформация ячеистой структуры. Этот процесс включает в себя сужение границ ячеек, расширение их центральных зон, свободных от дислокаций, а также измельчение и растворение интерметаллидов Al_6(Mn, Fe). Примечательно, что указанные изменения происходят не только на поверхностном слое материала, но и на глубине 2–3 мм, что существенно превышает проективные пробеги ионов на несколько порядков.

Список литературы

1. Давыдов В.Г. О некоторых актуальных проблемах разработки алюминиевых сплавов и технологий для авиакосмического применения // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2001. – № 4. – С. 32–36.

2. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2001. – 416 с.

3. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л., Колобнев Н.И. В кн.: Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. – Киев: Наукова думка, 1992. – 192 с.

4. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. / Под ред. Дж. М. Поута и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.

5. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация / Под ред. М.И. Гусевой. – М.: Наука, 1983. – 360 с.

6. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнодействия в ионно-имплантированных металлических материалах. – Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 328 с.

7. Гущина Н., Овчинников В.В., Голобородский Б., Мюкклич А., Визер Е. Радиационно-динамические явления в сплаве Al – 4 мас.% Cu при ионном облучении // Материалы XII Международной конференции по радиационной физике и химии неорганических материалов (РФХ-12). – Томск, 23–27 сентября 2003 г. – С. 192–195.

Полякова Е.П.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
ep_polyakova@bk.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОДКЛАДКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВ СПЛАВА В-1469-Т, ВЫПОЛНЕННЫХ СТП

Аннотация. В статье исследуется влияние материала опорной подкладки (медь М1 и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т) на микроструктуру и механические свойства сварных соединений листов из алюминиево-литиевого сплава В-1469-Т, полученных методом сварки трением с перемешиванием (СТП). Показано, что теплопроводность подкладки определяет температурный режим и скорость охлаждения, что влияет на размер зерна и прочностные характеристики шва. Соединения, выполненные с медной подкладкой, достигают 85% прочности основного металла, а со стальной – 80%. Металлографический анализ выявил отсутствие дефектов и формирование рекристаллизованной структуры с мелким зерном при использовании меди. Повышенная микротвёрдость в зоне шва объясняется измельчением структуры и упрочнением твёрдым раствором. Результаты позволяют оптимизировать технологию СТП для авиационных и космических конструкций.

Ключевые слова: алюминиево-литиевый сплав В-1469-Т; сварка трением с перемешиванием (СТП); опорная подкладка; микроструктура; механические свойства; теплопроводность; рекристаллизация.

Polyakova E.P.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
anna1-2016@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

INFLUENCE OF LINING ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF JOINTS OF V-1469-T ALLOY SHEETS MADE BY STP

Abstract. The article investigates the effect of backing material (copper M1 and stainless steel 12X18H10T) on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded (FSW) joints in sheets of V-1469-T aluminum–lithium alloy. It is shown that the thermal conductivity of the backing determines the temperature regime and cooling rate, which influence grain size and strength of the weld. Joints produced with a copper backing reach **85%** of the base

metal strength, while those with a steel backing achieve **80%**. Metallographic analysis revealed defect-free welds and a fine-grained recrystallized structure when using copper. Increased microhardness in the weld zone is attributed to grain refinement and solid solution strengthening. The results enable optimization of FSW technology for aerospace and aviation structural components.

Keywords: Aluminum–lithium alloy V-1469-T; Friction stir welding (FSW); Backing (supporting) plate; Microstructure; Mechanical properties; Thermal conductivity; Recrystallization.

Прогресс в авиационной и космической отраслях диктует потребность во внедрении современных материалов, обладающих улучшенными физико-механическими характеристиками. Повышающиеся требования к надежности, долговечности и весовой эффективности конструкций стимулируют улучшение состава алюминиевых сплавов для достижения наилучшего баланса эксплуатационных и технологических свойств. В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития алюминиевых сплавов является создание деформируемых сплавов с пониженной плотностью, легированных литием.

В ФГУП «ВИАМ» создан алюминиево-литиевый сплав третьего поколения под маркой В-1469. Данный материал рекомендован к применению для конструктивных элементов, испытывающих длительные сжимающие нагрузки в любых климатических условиях при температурах вплоть до 150°С. Сюда относятся такие узлы, как верхние панели крыла, лонжероны, балки, стрингеры и иные детали фюзеляжа [1–4].

Использование алюминиево-литиевых сплавов в сварных узлах способствует уменьшению массы изделий на фоне роста удельной прочности и жесткости, что улучшает эксплуатационные характеристики и повышает весовую эффективность. Однако применение традиционных методов плавления для соединения сплавов на основе системы Al–Cu–Li сопровождается рядом специфических дефектов: образованием пор, возникновением горячих трещин, а также существенным падением прочности шва по сравнению с основным металлом вследствие термического воздействия на основной материал в процессе сварки [5–7].

Устранение обозначенных трудностей становится возможным благодаря применению технологии сварки трением с перемешиванием (СТП), относящейся к категории сварки давлением. В рамках данного метода подводимая механическая энергия трансформируется в тепловую, причем генерация тепла происходит непосредственно в зоне будущего соединения. Формирование шва при такой сварке обусловлено совместным воздействием термических факторов и процессов пластической деформации.

В процессе сварки трением с перемешиванием вращающийся инструмент внедряется в кромки соединяемых листов, после чего движется вдоль шва, образуя прочное соединение [8]. Микроструктурные трансформации, происходящие в сплаве В-1469-Т при данном виде сварки, существенно воздействуют

на характеристики стыкового сварного соединения, определяя его способность успешно пройти последующую операцию ротационной вытяжки.

В результате воздействия высоких температур в процессе сварки и быстрого охлаждения при СТП происходят структурные трансформации, затрагивающие фазовые переходы, размер зеренной структуры и текстуру сплава. Изменение температурного режима и скорости охлаждения достигается за счёт регулирования тепловых граничных условий на нижней стороне заготовки, что реализуется с помощью опорных подложек, обладающих разными показателями теплопроводности. Теплопроводность опорной подложки может существенно влиять на итоговые характеристики сварного соединения.

Настоящее исследование посвящено анализу влияния двух типов материалов (меди М1 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т) для опорной подложки на температурное распределение в зоне сварного шва, изменения микроструктуры и конечные механические характеристики соединений, полученных методом СТП для алюминиевого сплава В-1469-Т.

Эксперименты проводились на листовых заготовках толщиной 2,5 мм, изготовленных из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава марки В-1469, прошедшего термическую обработку по режиму Т (закалка). Поверхность заготовок подвергалась химическому травлению в рамках подготовки к процессу сварки.

Для сварки образцов использовали экспериментальную установку, созданную на базе вертикального фрезерного станка с ЧПУ с усиленной фрезерной головкой.

Для СТП применяли инструмент производства Московского Политеха (рис. 1), у которого диаметр наконечника составлял 5 мм, а длина – 2,35 мм. Заплечик имел гладкую плоскую поверхность и диаметр 18 мм.

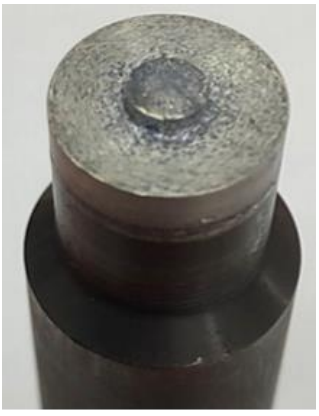


Рис. 1. Инструмента для сварки трением с перемешиванием

Сварка трением с перемешиванием осуществлялась в режиме поддержания постоянного осевого усилия на установившемся этапе. Параметры процесса, включая вертикальное давление на инструмент, а также частоту его вращения и поступательного движения, подбирались экспериментально

с целью достижения визуально качественного соединения без дефектов. На основе выбранных режимов были изготовлены сварные образцы для последующих испытаний, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазоны выбранных режимов сварки трением с перемешиванием листов сплава В-1469-Т

Усилие прижатия инструмента, кН	Частота вращения инструмента, об/мин	Скорость сварки, мм/мин	Угол наклона инструмента в направлении сварки, град.
7,5	850	115–155	1

Запись температурных показателей производилась в двух областях: в зоне сварного шва (зона перемешивания) с применением термопары, интегрированной непосредственно в штифт инструмента, а также в зоне термомеханического воздействия, где фиксация осуществлялась посредством термопары, размещенной со стороны, противоположной движению свариваемой заготовки.

Определение микротвердости осуществлялось с использованием автоматизированного прибора EmcoTest DuraScan 20. Измерения проводились по шкале HV1 при приложении нагрузки на индентор величиной 9,8 Н, а время выдержки под воздействием этого усилия составляло 10 секунд.

Структуру материалов исследовали, применяя стереомикроскоп Olympus SZ61 и инвертированный оптический микроскоп Olympus GX51. Обработку микрошлифов выполняли с использованием реактива Келлера, после чего проводили их осветление в 20%-ном растворе азотной кислоты.

Для оценки механических свойств сварных швов (предел прочности $\sigma_в$, относительного удлинения δ и угла изгиба) применялись методы и геометрические параметры образцов, регламентированные стандартом ГОСТ 6996–66. Оценка кратковременной прочности осуществлялась на поперечных образцах, полученных из сварных соединений. Принципиальная схема их вырезки показана на рисунке 2.

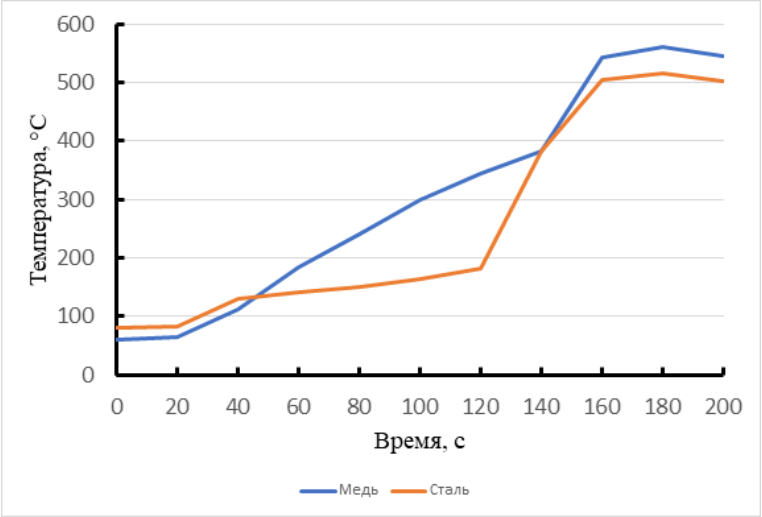


Рис. 2. Схема вырезки образцов для механических испытаний

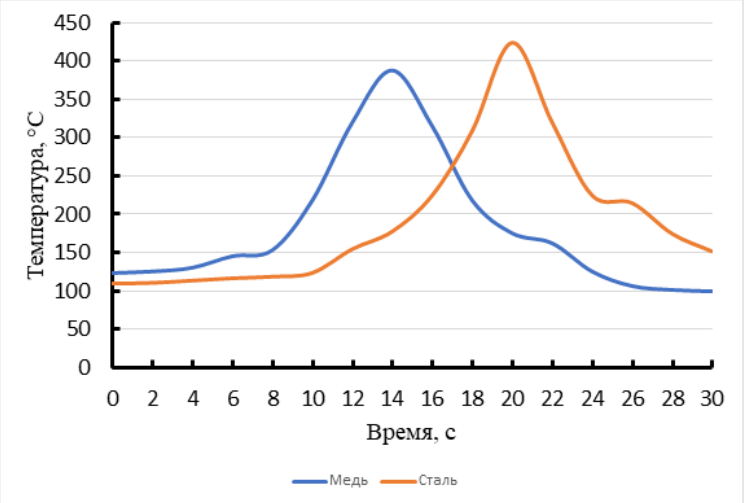
Рентгенографический контроль осуществлялся с использованием установки RE-320/14, где параметры съемки включали анодное напряжение 60 кВ, анодный ток 10 мА, время экспозиции 1,5 минуты и фокусное расстояние 800 мм. Для регистрации рентгеновского излучения использовалась радиографическая пленка марки AGFA D4.

Для проведения энергодисперсионной спектроскопии (EDS) поперечные сечения образцов, полученных методом сварки трением с перемешиванием (СТП), подвергали шлифовке и полировке до зернистости 1 мкм. В случае подготовки материалов для анализа методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) применялась дополнительная электрополировка в смеси метанола и азотной кислоты (в пропорции 2:1).

На рисунке 3 показано, как температуропроводность двух типов опорных подложек (ОП) сказывается на пиковых температурах, зафиксированных в зоне перемешивания (ЗП) и в зоне термомеханического воздействия.



а



б

Рис. 3. Термический цикл зоны перемешивания (а) и зоны термомеханического воздействия (б) с использованием двух опорных подкладок, выполненных на режиме: частота вращения инструмента 850 об/мин и скорости сварки 130 мм/мин

На рисунке 3, а наглядно показано, как температуропроводность двух видов опорных подложек (ОП) воздействует на максимальные значения температур, зарегистрированные в области сварного шва и зоне термомеханического воздействия.

При применении медной опорной подкладки максимальная температура нагрева в зоне сварного шва достигала 505 °С, тогда как использование опорной подкладки из стали приводило к существенно более высокому нагреву – до 553 °С. Для медной и стальной опорных подкладок в зоне термомеханического воздействия температура достигла значений 385 °С и 428 °С соответственно.

Ввиду того что теплопроводность стали (18 мм²/с) существенно уступает показателям меди (111 мм²/с), она медленнее отводит тепловую энергию от нижней поверхности свариваемой заготовки. Как следствие, применение стальной подкладки способствует повышению максимальных температур в зоне сварного шва по сравнению с использованием медной подкладки.

Изменение температурных показателей происходит более плавно, что наглядно демонстрируется фазами нагрева и охлаждения в зоне термомеханического воздействия. Как показано на рисунке 3б, применение медной подкладки способствует более интенсивному отводу тепла в окружающую среду. Этот факт подтверждается как ускоренным повышением температуры, так и быстрым её снижением, что в совокупности обеспечивает снижение максимального температурного значения термического цикла сварки.

Визуальный анализ качества сварного соединения подтвердил равномерное погружение инструмента и незначительное формирование грата на протяжении всей длины шва. Поверхность шва отличается однородной шероховатостью, при этом отсутствуют дефекты в виде задиров и следов перегрева.

Рентгенографическое исследование сварного соединения выявило полное отсутствие дефектов по всей протяженности шва, что подтверждает его пригодность для проведения последующих испытаний.

Исследования механических характеристик продемонстрировали, что предел прочности сварных соединений из сплава В-1469-Т достигает 85% от показаний базового материала при сварке на медной опорной подкладке, при этом пластические свойства остаются на приемлемом уровне. При сварке на стальной опорной подкладке предел прочности сварных соединений из сплава В-1469-Т составил 80% от предела прочности основного металла. Механические свойства сварных соединений листов из сплава В-1469-Т представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства сварных соединений сплава В-1469-Т, выполненных сваркой трением с перемешиванием

Материал опорной подкладки	Предел прочности сварного соединения $\sigma_в$, МПа	Коэффициент прочности сварного соединения *K*	Угол изгиба α, градус	Относительное удлинение δ,%
Медь	387–405 398	0,85	45–92 74	9,2–12,9 10,5
Сталь	368–392 375	0,80	40–82 68	8,9–11,8 9,9
Примечание: предел прочности основного материала составляет $\sigma_в$ = 468 МПа при относительном удлинении δ = 20%;				

Исходя из данных испытаний на растяжение сварных образцов из сплава В-1469-Т, были построены диаграммы деформирования с расчетом относительного удлинения. Выявлено, что для основного металла показатель в поперечном направлении превышает 19%, а в продольном достигает 14%. При этом средняя величина относительного удлинения для сварных образцов равна 10,4% (рис. 4).

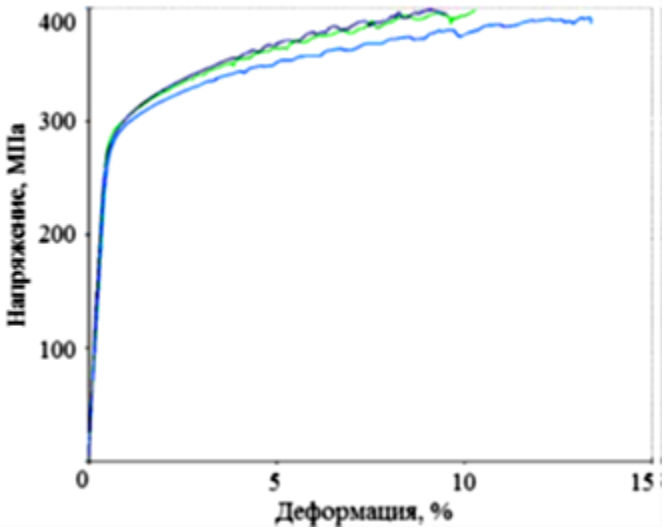


Рис. 4. Диаграмма деформирования сварных образцов из сплава В-1469-Т

Металлографический и фрактографический анализ выявил отсутствие в сварных соединениях дефектов слипания и внутренних несплошностей, свойственных данному виду сварки, которые невозможно зафиксировать методами неразрушающего контроля. Структура сварного шва включает типичные области: зону перемешивания, зону набегающего потока, зону отхода и основной металл.

Микроструктура зоны термомеханического воздействия, возникающей в процессе сварки трением с перемешиванием, демонстрирует существенные различия между входной (набегающей) и выходной (отступающей) сто-

ронами инструмента. Это обусловлено неодинаковым уровнем пластической деформации материала, как это показано на рисунке 5. Четкие границы зоны перемешивания сварного соединения выражены слабо, а структура в периферийной части приобретает вытянутую форму, ориентированную по направлению вращения инструмента.

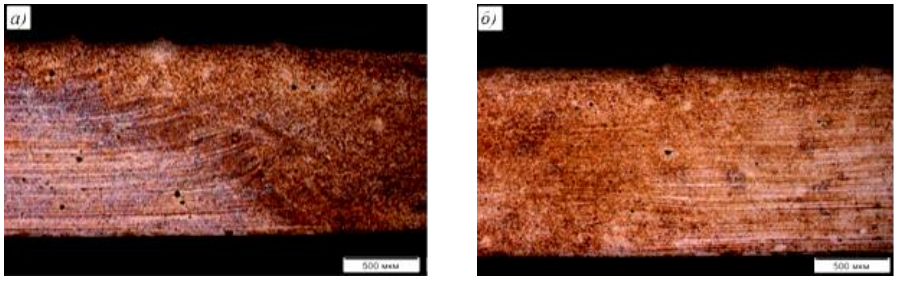
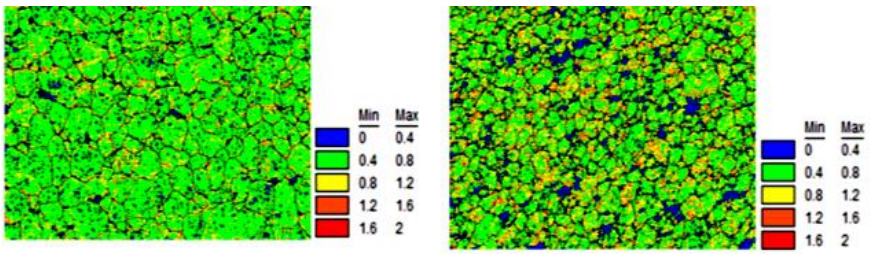


Рис. 5. Микроструктура (×50) сварных соединений сплава В-1469-Т со стороны набегания (а) и отхода инструмента (б)

Анализ микроструктуры зон разрушения образцов при механических испытаниях выявил специфические особенности, зависящие от вида механического испытания. В случае статического изгиба характерно слоистое строение излома; при этом в центральной части наблюдается внутризеренное разрушение, сопровождающееся образованием вязкого мелкоямочного рельефа, тогда как приповерхностный слой (толщиной около 110–140 мкм), отличающийся повышенной плотностью, разрушается посредством вязкого сдвига. Для образца, испытанного на ударную вязкость, основной материал демонстрирует вязкое ямочное разрушение, а зона у поверхности – проявляет механизм вязкого среза. При испытании на кратковременную прочность также фиксируется слоистая структура излома, где внутризеренное разрушение сопровождается формированием ямочного рельефа с разной степенью пластичности.

Микроструктурные особенности, возникающие в результате сварки трением с перемешиванием (СТП), характеризуются специфической эволюцией зерен и кристаллографической текстурой, которая определяется видом используемой опорной подкладки (ОП). Анализ EBSD-карт обратных полюсов выявляет случайное расположение ориентаций мелких равноосных зерен в обоих рассматриваемых вариантах подложки (рис. 6). Зона перемешивания представлена рекристаллизованными зернами, обладающими высокоугловыми границами и низкой плотностью дислокаций [9]. Оценка размеров зерен свидетельствует о существенном влиянии различных пиковых температурных режимов и скоростей охлаждения, которые обусловлены применением двух типов опорных подкладок. Более высокая скорость охлаждения и снижение пиковой температуры, свойственные медной опорной подкладке, способствуют формированию более мелких зерен (рис. 6, *б*) по сравнению со случаем использования стальной опорной подкладки (рис. 6, *а*).



а *б*

Рис. 6. Результаты измерений EBSD размеров зерна в области перемешивания при сварке на стальной (а) и медной (б) опорной подкладке

Размер зерен в центре сварного шва при применении стальной опорной подкладки в среднем составил 3,4±2,2 мкм, а для медной опорной подкладки этот показатель составляет 2,3±1,2 мкм. Подобные данные подтверждают закономерность рекристаллизации: чем ниже температура нагрева, тем мельче образуются зерна. Тем не менее, структура сварного шва неоднородна по величине зерен. Причина этого кроется в неравномерном распределении температурных полей, степени деформации и скорости деформации в разных участках в процессе СТП.

Анализ интегрального распределения зерен по размерам выявляет следующие закономерности: в сварном шве со стальной опорной подкладкой 70% частиц не превышают 4,3 мкм, тогда как остальные 30% находятся в пределах 4,3–13 мкм. При использовании медной опорной подкладки доля мелких зерен (≤ 4,3 мкм) возрастает до 90%, а оставшиеся 10% занимают диапазон 4,3–9 мкм. Наложение карты разориентации с цветовым кодированием на изображение качества дифракции подтверждает, что микроструктура обоих образцов характеризуется наличием как низкоугловых (2–15°), так и высокоугловых (> 15°) границ зерен.

Присутствие существенной доли низкоугловых границ зерен в рекристаллизованной микроструктуре свидетельствует о том, что процесс динамической рекристаллизации сопровождается непрерывным образованием новых межзеренных границ.

Полюсные фигуры, отражающие микротекстуру, свидетельствуют о том, что в зоне сварного шва концентрация текстурных компонентов выше при применении стальной опорной подкладки по сравнению с использованием медной.

Картограмма микротвёрдости свидетельствует, что зона сварного шва сразу после выполнения процесса СТП характеризуется более высокими значениями твердости (84–115 HV) по сравнению с основным материалом (60–70 HV). Данная тенденция наблюдается для обоих рассматриваемых вариантов опорных подложек. Более низкая твердость основного металла указывает на отсутствие в его структуре упрочняющих выделений.

Повышение твердости в зоне сварного шва обусловлено синергетическим воздействием упрочнения твердым раствором и измельчения структуры, что характерно для обеих модификаций опорных подложек. При этом увеличение твердости замедляется и выходит на плато.

Зона, расположенная со стороны набегания инструмента в обоих сварных соединениях сразу после завершения процесса СТП, обладает повышенной твердостью. Это объясняется тем, что данная область подверглась более сильному термическому воздействию.

Характер распределения микротвердости по поперечному сечению типичен для сварных соединений термически упрочняемых материалов. Область пониженных показателей микротвердости совпадает с переходными участками от сварного шва к зоне термического влияния. Дополнительно выявлено, что ширина зоны термического влияния превышает радиус заплечика инструмента всего на 2,5–3 мм, что свидетельствует о слабом термическом воздействии примененного режима сварки трением с перемешиванием на основной материал.

По сравнению с прилегающей к шву областью, в основном металле параметры размера и концентрация выделений Ω′-фазы существенно ниже. Наибольшая плотность упрочняющих частиц фиксируется в околошовной зоне, что указывает на протекание там первичных стадий старения под влиянием сварочного термического цикла и приводит к уменьшению твердости закаленной структуры.

Список литературы

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.

2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмостеклопластики на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91. DOI: 10, 17580/tsm.2016.08.13.

3. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 03. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 03.04.2026). DOI: 10, 18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.

4. Каблов Е.Н., Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Жегина И.П., Фомина М.А. Исследование влияния коррозионной среды на процесс накопления повреждений и характер разрушения конструкционных алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 при испытаниях на растяжение и малоцикловую усталость // Материаловедение. 2017. №1. С. 41–48.

5. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.

6. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-ой Междунар. конф. «Алюминий-2. Сварка и пайка». М., 2012. Ст. 08.

7. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Овчинников В.В., Махин И.Д. Особенности формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469 // Сварочное производство. 2012. №6. С. 30–36.

8. R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Mater. Sci. Eng. R Rep. 50 (2005) 1–78.

9. A. Heidarzadeh, S. Mironov, R. Kaibyshev, G. Çam, A. Simar, A. Gerlich, F. Khodabakhshi, A. Mostafaei, D.P. Field, J.D. Robson, A. Deschamps, P. J. Withers, Friction

stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution, Prog. Mater. Sci. 117 (2021), 100752.

Артемьев Г.К.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
gennadiia127@gmail.com

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ СЛОЕВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ

Аннотация. В работе с использованием программного комплекса QForm исследован процесс осесимметричной вытяжки биметаллической заготовки. Целью исследования является анализ изменения толщины и напряженно-деформированного состояния слоев заготовки при различных значениях их начальной толщины. Биметалл состоит из двух слоев: внутреннего слоя из алюминиевого сплава АМг6 и внешнего слоя из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Рассматривается процесс получения цилиндрической детали со сферическим дном. Численное моделирование выполнено для трех вариантов соотношения толщин слоев при постоянной суммарной толщине заготовки 9 мм. В результате получены распределения изменения толщины и среднего напряжения по мере удаления от центра заготовки к периферии. Установлено, что стальной слой преимущественно подвергается утонению, максимальное значение которого достигает 25% в зоне перехода от цилиндрической части к сферической. Внутренний слой из сплава АМг6, напротив, в основном утолщается, при этом максимальное утолщение составляет 21% в цилиндрической части. Показано, что при увеличении начальной толщины слоя АМг6 наблюдается линейное изменение толщины обоих слоев и изменение их напряженного состояния. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета начальных толщин слоев при анализе процессов вытяжки биметаллических заготовок.

Ключевые слова: биметалл; многослойная заготовка; утонение слоев; осесимметричная вытяжка; изменение толщины, напряженное состояние.

Artemyev G.K.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia Moscow
gennadiia127@gmail.com

INFLUENCE OF LAYER THICKNESS RATIO ON THE VARIATION OF DEFORMATION PARAMETERS OF A BIMETALLIC BLANK DURING DRAWING

Abstract. The process of axisymmetric deep drawing of a bimetallic blank was investigated using the QForm software package. The objective of the study is to analyze the variation in thickness and the stress–strain state of the individual layers under different initial thickness ratios. The bimetal consists of two layers: an inner layer made of aluminum alloy AA 5556 and an outer layer made of stainless steel AISI 304. The process of forming a cylindrical part with

a spherical bottom is considered. Numerical simulation was carried out for three different thickness ratios of the layers while maintaining a constant total blank thickness of 9 mm. As a result, distributions of thickness variation and mean stress along the section of the blank were obtained. It was established that the steel layer predominantly undergoes thinning, with a maximum value reaching 25% in the transition zone from the cylindrical wall to the spherical bottom. The inner aluminum layer, in contrast, mainly exhibits thickening, with a maximum increase of 21% in the cylindrical region. It is shown that increasing the initial thickness of the AA 5556 layer leads to a linear change in the thickness of both layers, as well as variation in their stress state. The results indicate the necessity of accounting for initial layer thicknesses when analyzing deep drawing processes of bimetallic blanks.

Keywords: bimetal, sheet metal, thinning, axisymmetric drawing, thickness change, tense state.

Биметаллические изделия в современных конструкциях последнее время применяются чаще. Особенно часто используется сочетание алюминий – сталь, из-за большой разницы свойств этих материалов [4, 6, 9]. В ходе осесимметричной вытяжки биметаллической заготовки, неизбежно происходит изменение толщины биметаллического листа в целом и соответственно каждого слоя отдельно. Преимущественно данное изменение толщины выражается в виде утонения в области дна и утолщения на фланце заготовки [1]. Вместе с вышесказанным в каждом слое возникает напряженно-деформированное состояние, результаты изучения которого являются ценной информацией для контроля толщины заготовки после вытяжки, что в последствии может помочь в достижении требуемых параметров конечного изделия.

Целью исследования является анализ напряженно-деформированного состояния с учетом изменения толщины слоев заготовки в процессе осесимметричной вытяжки при различных значениях начальных толщин алюминиевого сплава АМг6 и соответственно стального слоя марки 12Х18Н10Т.

Для достижения данной цели процесс вытяжки был промоделирован в программном комплексе QForm в нескольких вариациях с различными значениями начальных толщин каждого слоя.

Для получения результата используется метод численного моделирования процесса осесимметричной вытяжки в программном комплексе CAE-моделирования QForm. В качестве объекта исследования взята биметаллическая заготовка с общей толщиной 9 мм с внутренним слоем из алюминиевого сплава АМг6 и внешним из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, начальной толщиной каждого слоя, варьируемой в зависимости от варианта моделирования, соответственно из которой посредством вытяжки получают цилиндрическую деталь с сферическим дном (рис. 1).

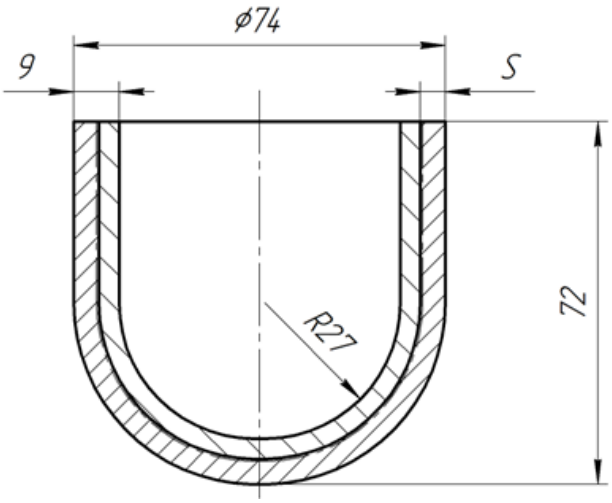


Рис. 1. Чертеж биметаллической заготовки

Расчет напряженно-деформированного состояния заготовки общей толщиной 9 мм был выполнен в трех вариантах. В первом варианте начальная толщина слоя из алюминиевого сплава марки АМг6 равняется 4 мм, в втором варианте начальная толщина слоя АМг6 равна толщине стального слоя и принимает значение 4,5 мм, в третьем варианте слой марки АМг6 толщиной 5 мм. Температура заготовки 20°С, толщина слоев материала варьируется АМг6 – 4...5 мм, 12Х18Н10Т – 5...4 мм с шагом 0,5 мм, общая толщина биметаллического листа 9 мм.

В результате моделирования всех вышеописанных вариантов, были построены графики изменения значений толщины в процентах от первоначальной и графики среднего напряжения в МПа по мере удаления от центра заготовки к периферии. Полученные кривые для каждого варианта обозначены на графиках следующим образом: Внутр.(толщ.) – внеш.(толщ.). Например обозначение АМг6(4)-12Х18Н10Т(5), означает что кривая принадлежит варианту расчета, где внутренним слоем является алюминиевый сплав АМг6 толщиной 4 мм, а внешним соответственно является стальной слой 12Х18Н10Т толщиной 5 мм.

По графикам видно, что наибольшие деформации претерпевает стальной слой при варианте моделирования, где начальная толщина стального слоя 4 мм при внешнем расположении, а соответственно начальная толщина слоя из алюминиевого сплава 5 мм. Напряжения преимущественно растягивающие. Максимальное утонение наблюдается в зоне постепенного перехода от цилиндрического участка к сферической области и составляет 25%. (Рис. 2, 3)

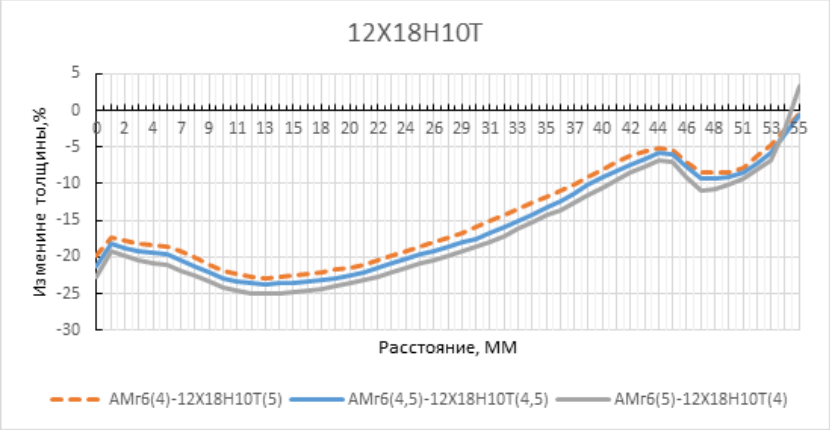


Рис. 2. Графики изменения толщины слоя марки 12Х18Н10Т

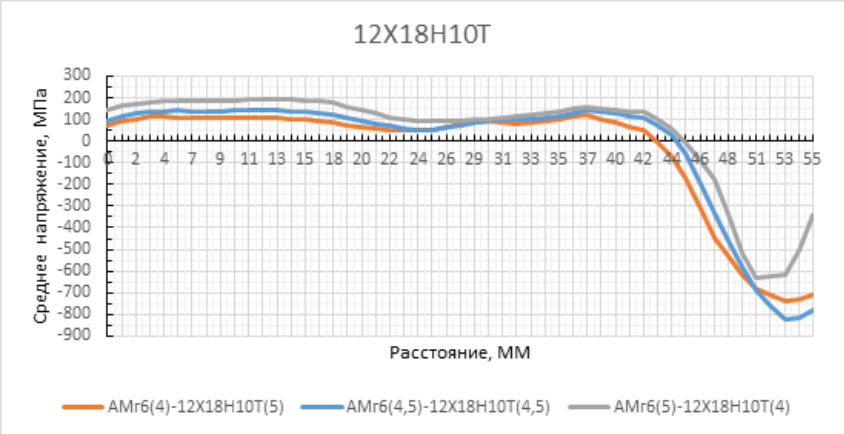


Рис. 3. Графики изменения среднего напряжения стального слоя

В свою очередь внутренний слой из алюминиевого сплава АМг6 в основном претерпевает деформации по увеличению толщины, сосредоточенной в цилиндрической части. Преобладающими напряжениями являются сжимающие. Максимальное утолщение данного слоя происходит при варианте моделирования, где внутренний слой марки АМг6 толщиной 4 мм, а стальной соответственно толщиной 5 мм и составляет 21%. (Рис. 4, 5).

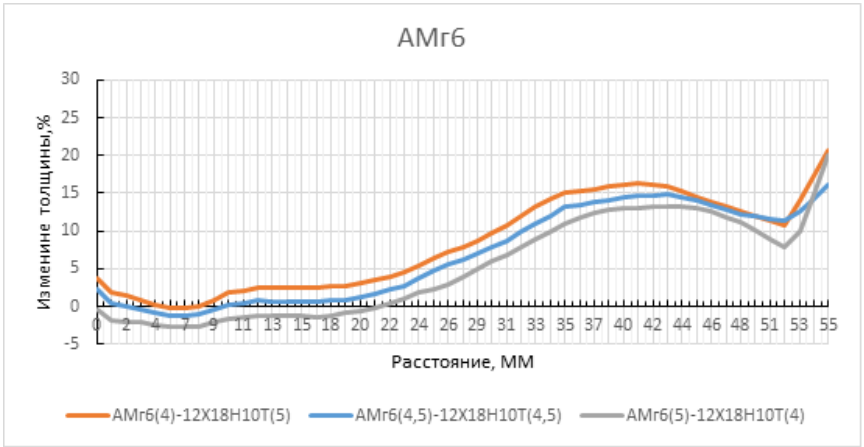


Рис. 4. Графики изменения толщины слоя марки АМг6

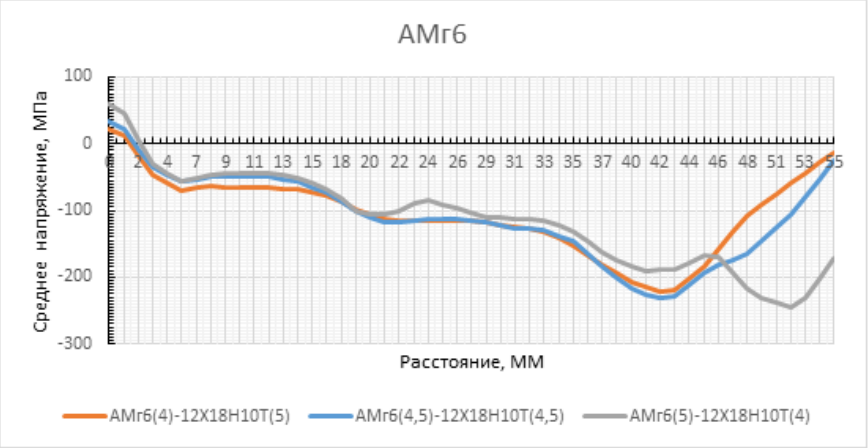


Рис. 5. Графики изменения среднего напряжения слоя марки АМг6

При анализе суммарной толщины были построены кривые изменения толщины в процентах по мере удаления от центра вытянутой заготовки к периферии, на которых заметно, что биметаллический лист при вытяжке преимущественно утоняется в зоне перехода от сферической части к цилиндрической. Максимальное утонение наблюдается при варианте, где начальная толщина внутреннего слоя АМг6 равна 5 мм и составляет 11,8% (Рис. 6).

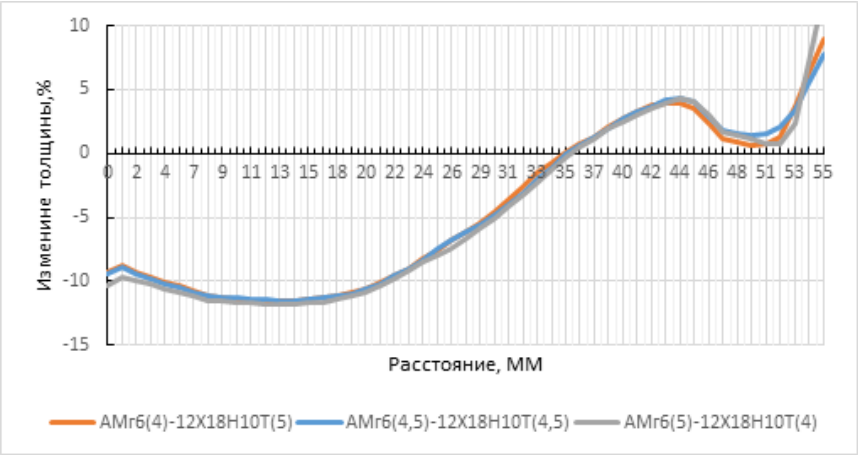


Рис. 6. Графики изменения суммарной толщины

Также в результате исследования были получены средние значения изменения толщины в процентах и изменения среднего напряжения в МПа и составлены сводные таблицы 1, 2.

Таблица 1

Средние значения толщины,%

Толщина(ср.знач)					
	АМг6(4)-12Х18Н10Т(5)	разница модулей	АМг6(4,5)-12Х18Н10Т(4,5)	разница модулей	АМг6(5)-12Х18Н10Т(4)
АМг6	8,3	1,5	6,8	1,7	5,1
12Х1810Т	–14,7	1,0	–15,7	1,1	–16,8

Таблица 2

Средние значения среднего напряжения, МПа

Толщина(ср.знач)					
	АМг6(4)-12Х18Н10Т(5)	разница модулей	АМг6(4,5)-12Х18Н10Т(4,5)	разница модулей	АМг6(5)-12Х18Н10Т(4)
АМг6	–105	4,2	–109,2	4,1	–113,4
12Х1810Т	–44,3	24,7	–19,6	21,1	40,7

Исходя из таблиц средних значений заметно, что с каждым увеличением начальной толщины слоя АМг6 на 0,5 мм, толщина слоя АМг6 после вытяжки изменяется в среднем на 1,6%, а толщина слоя 12Х18Н10Т изменяется на 1%. В свою очередь среднее напряжение у слоя марки АМг6 изменяется на 4,1 МПа, а среднее напряжение 12Х18Н10Т на 23 МПа.

Из этого следует, что зависимость изменения суммарной толщины от увеличения толщины слоя АМг6 линейна для обоих слоев (Рис. 7).

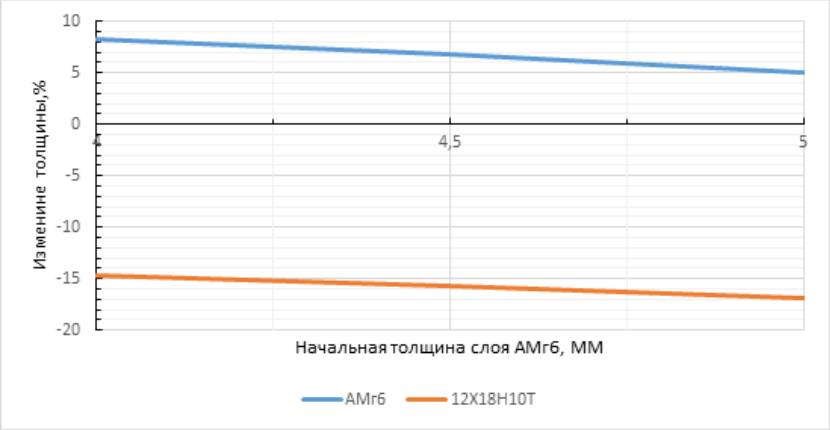


Рис. 7. Изменение толщины заготовки от толщины слоя АМг6

Расширение спектра использования биметалла заставляет производителей более внимательно относиться к возникающим в процессе деформации изменение толщин слоев и остаточным напряжениям. Максимальное утонение наблюдается при варианте, где начальная толщина внутреннего

слоя АМг6 равна 5 мм и составляет 11,8%. При увеличении начальной толщины слоя АМг6 толщины обоих слоев линейно уменьшается. В связи с этим можно констатировать что нельзя просто пользоваться усредненными характеристиками материала, а нужно учитывать начальные толщины каждого слоя биметалла.

Список литературы

1. Артемьев Г.К. Изменение толщины и напряженного состояния слоев биметаллической заготовки при вытяжке // СНК-2025: материалы LXXV Междунар. студенч. науч. конф., Москва, 17–23 марта 2025 г. – М.: Московский политехнический университет, 2025. – С. 818–824. – EDN EUYIQW.
2. Артемьев Г.К., Боднар М.В., Типалин С.А. Толщина слоев биметаллической заготовки при вытяжке // Новые технологии высшей школы: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Москва, 17–24 февр. 2025 г. – М.: Московский политехнический университет, 2025. – С. 622–627. – EDN IVHBZD.
3. Битков В.В. Оценка неоднородности деформации при пластической обработке осесимметричных биметаллических изделий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2011. – №5. С.3–12
4. Емельянов В.В., Сосенушкин Е.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния биметаллической заготовки в процессе ротационной вытяжки конических деталей с утонением стенки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2018. – №3. С.10–18
5. Емельянов В.В. Повышение производительности изготовления конического переходника из двухслойной листовой заготовки ротационной вытяжкой с принудительным переутонением // Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.02.09 Технологии и машины обработки давлением. Москва 2021г. 169 с.
6. Первухина О.Л., Денисов И.В. Двухслойные стали для ответственных металлоконструкций */Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020, № 11 (246). С. 46–52.*
7. Судник Л.В., Петров И.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Моисеев В.А. Перспективные направления применения биметаллов в машиностроении */Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 2 (310). С. 80–88.*
8. Типалин С.А. Численное исследование процесса пластического изгиба вариантов биметаллической полосы с композицией 12Х18Н10Т-АМГ6 / Технология легких сплавов. №1, 2016 С.144–149
9. Типалин С.А., Кучковский Ю.П., Сапрыкин Б.Ю., Типалина А.В. Исследование деформирования биметалла с использованием программного комплекса AUTOFORM / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 8. С. 34–37
10. Типалин С.А., Калпин Ю.Г., Куприянова Н.А. Особенности расчета силовых параметров правки биметаллических листовых заготовок / Черные металлы, №11, 2023. С 42–46

Дмитрашко П.С.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
garentor@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ВЫБОР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ПАКЕТА ТОНКИХ ЛИСТОВ СПЛАВА 1565ЧМ

Аннотация. В статье исследуется влияние частоты вращения рабочего инструмента на процесс точечной сварки трением с перемешиванием (ТСТП) тонких листов алюминиевого сплава 1565чМ, применяемого в автомобилестроении. Экспериментально определены оптимальные параметры режима, при которых достигается максимальная температура в зоне формирования соединения. Показано, что наибольшая эффективность процесса нагрева обеспечивается при окружной скорости вращения рабочего инструмента 1,0–1,4 м/с. Полученные результаты позволяют повысить качество и надёжность сварных соединений в массовом производстве.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 1565чМ, тонкий лист, точечная сварка трением с перемешиванием, момент трения, температура нагрева, удельное тепловыделение.

Dmytrashko P.S.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
garentor@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

SELECTION OF THE ROTATION SPEED OF THE WORKING TOOL FOR FRICTION SPOT WELDING WITH STIRRING OF A PACKAGE OF THIN SHEETS OF ALLOY 1565chM

Abstract. The article investigates the effect of the rotation speed of the working tool on the process of spot welding by friction with stirring (TSTP) of thin sheets of aluminum alloy 1565chM used in the automotive industry. The optimal parameters of the mode at which the maximum temperature in the joint formation zone is achieved are experimentally determined. It is shown that the highest efficiency of the heating process is provided at a circumferential rotation speed of the working tool of 1.0–1.4 m/s.

Keywords: 1565chM aluminum alloy, thin sheet, friction spot welding, friction torque, heating temperature, specific heat dissipation.

В последние годы в автомобильной промышленности наблюдается тенденция к использованию алюминиевых сплавов при производстве внешних элементов кузова – капота, дверей и багажника. Эти элементы состоят из наружной обшивки и усилителя, соединяемых друг с другом нахлесточным соединением. При сварке данного соединения не допустим выход проплава шва на наружную поверхность обшивки. Для соединения таких тонких листов требуется применение точечной сварки.

Наиболее перспективным способом реализации заданного соединения считается точечная сварка трением с перемешиванием (ТСТП), обеспечивающая значительное упрощение технологического оборудования и возможность использования роботизированных комплексов при изготовлении сварных элементов кузова автомобиля [1–5].

В соответствии с технологией разработанной компанией Mazda (Япония) [6–8] (см. рис. 1), вращающийся инструмент погружается в заготовку, вызывая переход металла в пластичное состояние и интенсивное перемешивание материала под заплечиком инструмента. Затем инструмент извлекается, оставляя на поверхности детали характерное углубление.

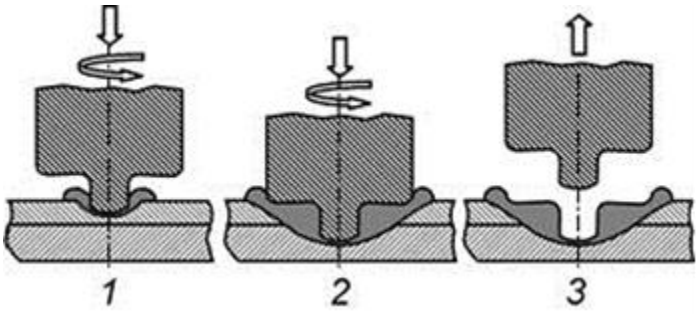


Рис. 1. Схема точечной сварки трением с перемешиванием с погружением: 1 – погружение инструмента; 2 – перемешивание металла деталей (образование сварного соединения); 3 – вывод инструмента

Эксперименты по сварке точечных нахлесточных соединений выполняли на листах сплава 1565ч толщиной 1,0 мм в отожженном состоянии «М» Химический состав сплава 1565ч приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав листов сплава 1565чМ

Марка сплава	Массовая доля элементов,%									
	Al	Mg	Mn	Be	Zr	Cu	Zn	Cr	Fe + Si	Прочие примеси, сумма
1565ч	Осн.	5,75	0,70	0,0005	0,09	0,07	0,50	0,06	0,2 + 0,12	0,10

Фактические механические свойства листов из сплава 1565чМ толщиной 1 мм приведены в таблице 2.

Таблица 2

Фактические механические свойства листов из сплава 1565чМ толщиной 1,0 мм

Свойства	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, МПа
Фактические	335–350 345	150–170 160	22,6–24,0 22,0

Точечную сварку трением с перемешиванием нахлесточных соединений листов сплава 1565чМ осуществляли на опытной установке, сформированной на базе модернизированного фрезерного станка портального типа. Конфигурация сварочного инструмента и режимы СТП представлены в табл. 3. Одна партия образцов сваривалась без зачистки поверхности в зоне нахлестки, а вторая часть – с механической зачисткой контактирующих поверхностей листов в нахлестке.

Таблица 3

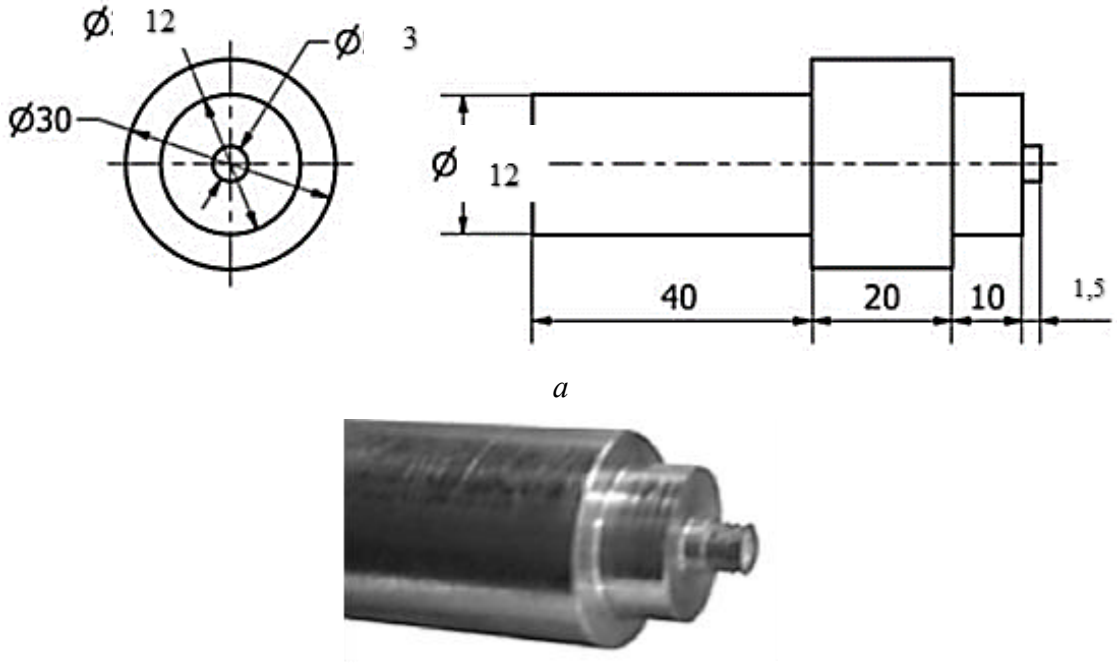
Параметры точечной сварки трением с перемешиванием

Параметр	Характеристика
Сварочный инструмент	
Материал инструмента	Сталь Р6М5
Диаметр заплечика, мм	12,0
Диаметр стержня (наконечника), мм	3,0
Длина стержня (наконечника), мм	1,5
Параметры режима СТП	
Частота вращения рабочего инструмента, об/мин	800, 1000, 1800, 2500 и 4000
Время сварки, сек.	3
Угол наклона инструмента, град.	0
Осевое усилие на инструмент, Н	4300–5600

На рисунке 2 приведен эскиз рабочего инструмента. Инструмент имеет плоский заплечик и цилиндрический стержень. Цилиндрический профиль стержня обеспечивает осесимметричное распределение температуры и явления теплопередачи через сварные швы. Влияние круговой скорости потока, обусловленной цилиндрическим штифтом, на осесимметричное распределение температуры невелико.

При сварке выполнялась регистрация основных параметров процесса: осевого усилия P и частоты вращения сварочного инструмента ω. Время сварки выдерживалось постоянным 3 с.

Для контроля температурного режима в процессе точечной сварки трением с перемешиванием (ТСТП) при разных скоростях вращения инструмента применялся цифровой мультиметр UT61B. Измерения проводились с использованием термопары типа хромель-алюмель.



а

б

Рис. 2. Эскиз (а) и внешний вид (б) рабочего инструмента

Испытания механических свойств точечных соединений на отрыв и срез проводили на универсальной испытательной машине Walter + Bai AG LFM 400 kN в соответствии с ГОСТ 6996–66. Испытывались образцы шириной 30 мм и длиной 170 мм со сварной точкой, расположенной по середине образца. Соединения ТСТП сплава 1565чМ испытывались при постоянной скорости нагружения 0,1 мм/с.

Можно рассчитать параметры технологического процесса в зависимости от свариваемого материала и инструмента, используемого при выполнении точечного соединения.

Тепловыделение, генерируемое вовремя ТСТП, в основном зависит от профиля заплечика инструмента, геометрии штифта, скорости вращения, коэффициента трения, осевой силы, направленной вниз, и времени выдержки [9, 10]. Термомеханический процесс вовремя ТСТП преобразует производимую механическую энергию за счет вращения инструмента в подвод тепла к обрабатываемой детали.

Тепловые затраты на процесс ТСТП (Q) можно рассчитать с помощью уравнения

$$Q = 1312\mu PKA\omega rt \quad (1)$$

где P – приложенное направленное вниз усилие, Н; KA – отношение площади контакта профиля буртика к площади поперечного сечения инструмента, ω – скорость вращения рабочего инструмента (рад/с) равно $2\pi n;$ t – время выдержки в процессе ТСТП, с; r – радиус штифта инструмента, мм; μ – коэффициент трения между инструментом и алюминиевым сплавом, равен 0,4 [11].

$$KA = \frac{R_з^2 - R_ш^2}{R_з^2} \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) тепловую нагрузку для получения однородных точечных соединений внахлестку сплава 1565чМ можно рассчитать с помощью уравнения (3)

$$Q = 1{,}859 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot P \cdot t \quad (3)$$

На рисунке 3 представлен подвод тепла к соединению при частотах вращения рабочего инструмента от 800 до 4000 об/мин. Выделяемое тепло, согласно расчету, увеличивается с увеличением частоты вращения до 4000 об/мин. Частота вращения 4000 об/мин обеспечивает максимальную тепловую энергию, вводимую в зону сварки – 2,6 кДж.



Рис. 3. Расчетная зависимость вырабатываемой тепловой энергии в процессе ТСТП от частоты вращения рабочего инструмента

Экспериментальные термические циклы сварных точек в зависимости от частоты вращения рабочего инструмента представлены на рис. 4.

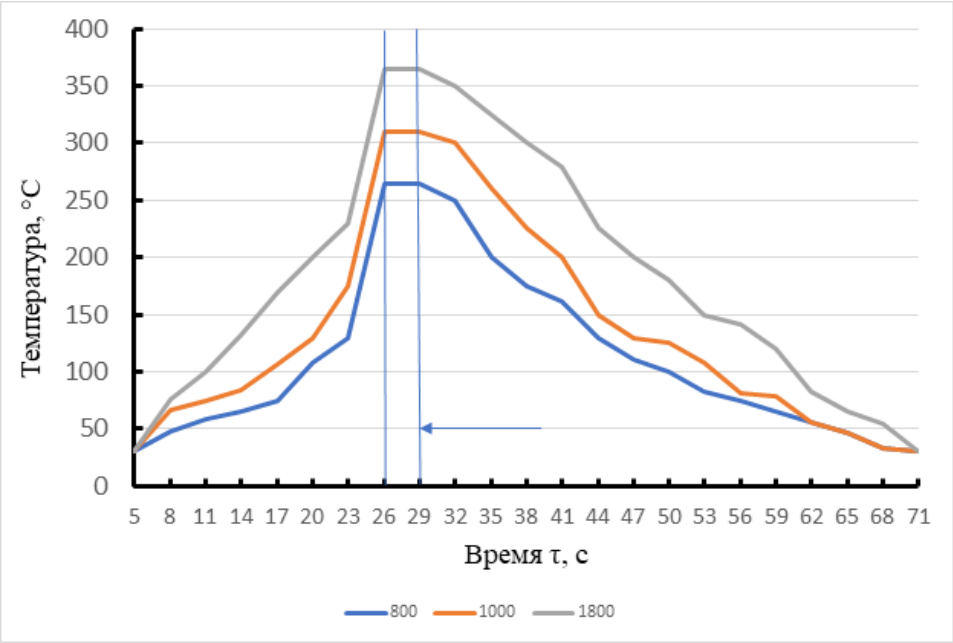


Рис. 4. Термические циклы точечных соединений листов сплава 1565чМ при постоянном времени выдержки 3 с при частотах вращения рабочего инструмента 800, 1000 и 1800 об/мин

На рисунке 5 отражены экспериментальные результаты, демонстрирующие зависимость пиковой температуры в области сварного соединения от частоты вращения при длительности выдержки 3 секунды.

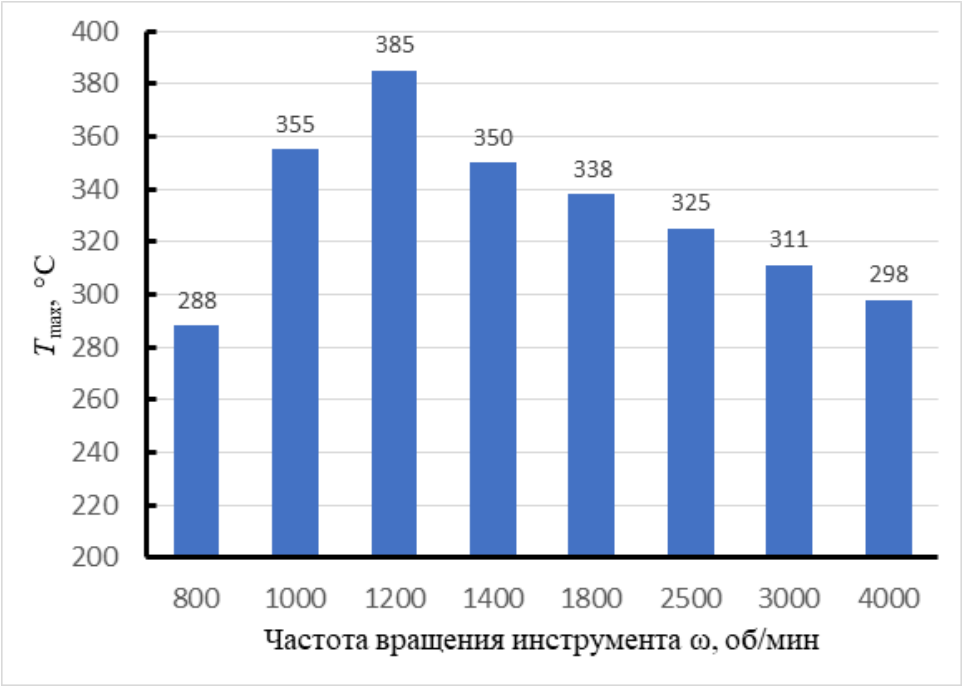


Рис. 5. Влияние частоты вращения рабочего инструмента на максимальную температуру нагрева металла в зоне формирования сварной точки

Анализ данных показывает, что при увеличении частоты вращения с 800 до 1200 об/мин наблюдается рост температуры с 288 °С до максимальных 385 °С. Дальнейшее повышение частоты вращения сопровождается снижением температуры: при 4000 об/мин она составляет 298 °С. Таким образом, кривая имеет выраженный максимум в диапазоне 1000–1200 об/мин, после чего наблюдается спад.

Подобная зависимость может быть связана с особенностями теплообмена и охлаждения системы: на низких и средних частотах преобладает тепловыделение, а при дальнейшем увеличении скорости усиливаются процессы теплоотвода или изменяется режим работы оборудования. График иллюстрирует нелинейный характер теплового баланса в исследуемом диапазоне частот вращения рабочего инструмента.

Таким образом наблюдается достаточно существенное расхождение между расчетными данными (рис. 3) и экспериментом (рис. 5).

Эксперименты по измерению тепловыделения проводились на скоростях вращения шпинделя фрезерного станка в диапазоне 800–4000 об/мин (83,7–418,6 $с^{-1}$). При этом за счет регулирования усилия сжатия рабочего инструмента и пластины температура места контакта на всех режимах поддерживалась постоянной – 385±5 °С.

Анализ этих данных показывает, что с увеличением угловой скоростей вращения с 83,7 до 418,6 $с^{-1}$ величина момента трения рабочего инструмента относительно алюминиевой пластины уменьшается с 8,8 до 1,5 Н×м (рис. 6, а).

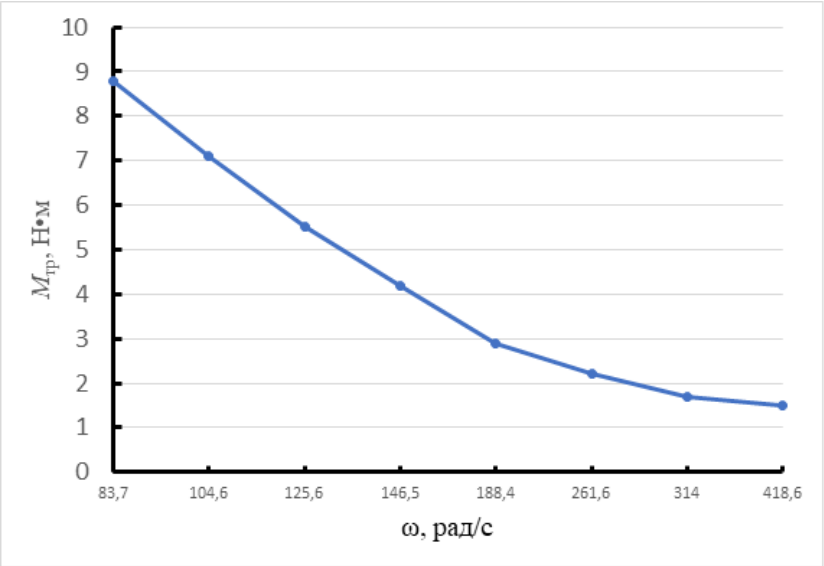
Это обусловлено тем, что при росте скорости вращения снижается количество очагов схватывания на контактной поверхности и исключается глубокое вырывание частиц металла, которое сменяется процессом полирования поверхностей [24]. В связи с этим с повышением скорости вращения момент трения уменьшается.

Обобщение результатов изменения момента трения от скорости вращения рабочей трубки (рис. 6) имеет вид зависимости

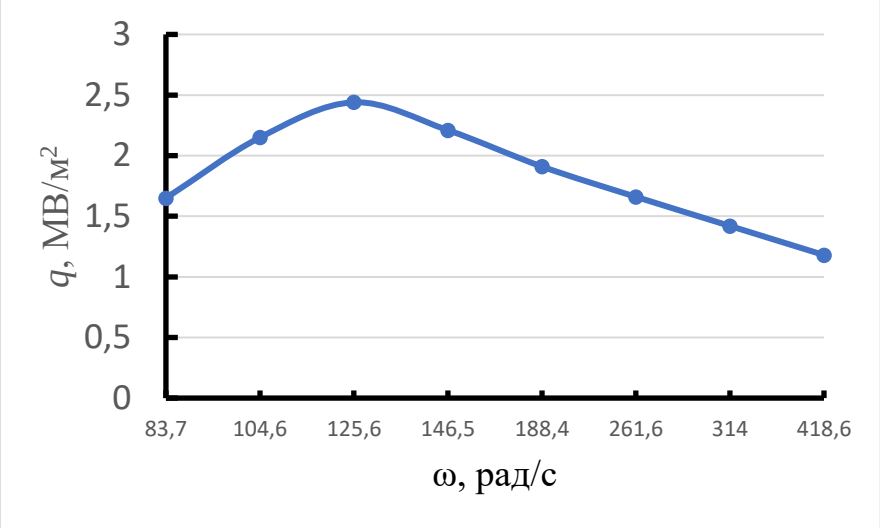
$$M_{тр} = 0{,}0001\omega^2 - 0{,}085\omega + 5{,}62$$

достоверность аппроксимации не превышает $R^2 = 0{,}98$.

Удельное тепловыделение при трении, рассчитанное с учётом указанной зависимости, прямо пропорционально крутящему моменту и угловой скорости ω, а также обратно пропорционально площади контакта рабочего инструмента и обрабатываемой пластины (рис. 6, б). Представленные на графике показатели учтены с учётом потерь тепла.



а



б

Рис. 6. Зависимость момента трения (а) и удельного тепловыделения (б) от угловой скорости вращения рабочего инструмента

Зависимость удельного тепловыделения от угловой скорости вращения представляет собой параболическую кривую: величина растет в интервале от 83,7 до 125,6 $с^{-1}$, а затем снижается при скоростях от 146,5 до 418,6 $с^{-1}$. Пиковое значение удельного тепловыделения достигает 2,48 МВт/м² при частоте вращения ω = 125,6 $с^{-1}$. Такого рода динамика обусловлена следующими факторами. В диапазоне от 83,7 до 125,6 $с^{-1}$ (полуторный рост скорости) момент трения падает в 2,3 раза, что приводит к увеличению тепловыделения на 50%. При дальнейшем ускорении до 418,6 $с^{-1}$ скорость возрастает в 3,3 раза, а момент трения уменьшается в 1,8 раза, вследствие чего интенсивность тепловыделения снижается на 45–60%.

На основе аппроксимации данных выведена формула для определения удельного тепловыделения (МВт/м²) в функции от угловой скорости вращения инструмента при реализации ТСТП:

$$q_{\text{ст}} = -0{,}001\omega^2 + 0{,}0285\omega + 0{,}7022$$

Зависимость удельной тепловой мощности от линейной скорости вращения (с учётом потерь тепла) показана на рис. 7. Кривая построена на основе данных рис. 6, б с учётом диаметра рабочей трубки.

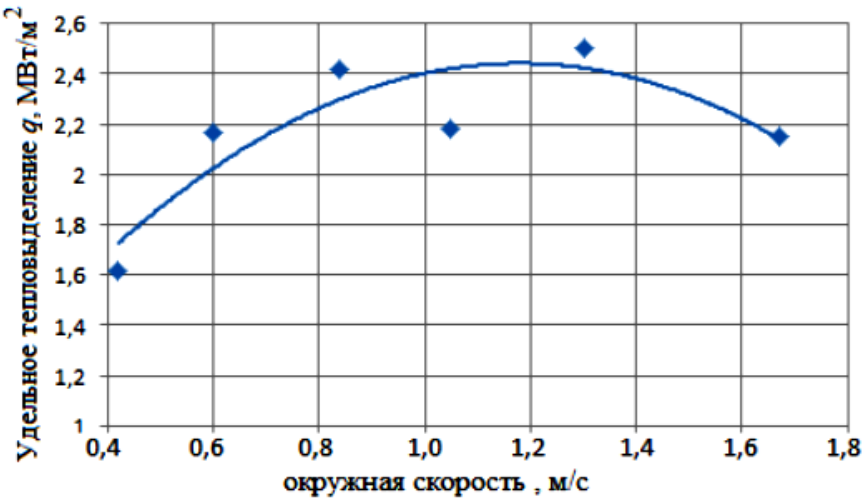


Рис. 7. Зависимость удельного тепловыделения от окружной скорости вращения рабочего инструмента

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что при точечной сварке трением с перемешиванием наиболее высокое тепловложение в свариваемые листы сплава 1565чМ обеспечивается при окружной скорости вращения рабочего инструмента в диапазоне 1,0–1,4 м/с. Следует также указать, что этот параметр следует относить к заплечику рабочего инструмента, который обеспечивает наибольший ввод тепла в зону формирования соединения.

Список литературы

1. Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Temple-Smith P., Dawes C.J. Friction stir butt welding. GB Patent № 9125978.8. International patent application PCT/GB92/02203. 1991.

2. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство «Руда и металлы», 2020, – 476 с.

3. Suryanarayanan R.; Sridhar V.G. Studies of the Effect of Friction Stir Spot Welding Process Parameters–Review. Materials. Issue 2020, 37, 2695-2702.

4. Yang H.W.; Fu T.; Lee V.Y. Spot Friction Stir Welding: A Review of Macro- and Microstructure, Properties, and Modeling of Bonding Processes. Advances in Materials Science and Engineering. 2014, 697170

5. Suryanarayanan R.; Sridhar V.G. Influence of Process Parameters in Pinless Friction Stir Spot Welding of Alloys Al 5754-Al 6061. Materials. 2020, 9, 261–272.

6. Hirsch J. Latest Developments in the Field of Aluminum for Automotive Applications. Transl. Non-Ferrous Metals. Soch. China 2014, 24, 1995–2002.

7. Uematsu Y., Tokaji K., Tozaki Y., Nakashima Y. Fatigue behaviour of dissimilar friction stir spot weld between A6061 and SPCC welded by a scrolled groove shoulder tool // Procedia Engineering. 2010, V. 2. P. 193–201.

8. Malafaia A. M., Milan M. T., Oliveira M. F., Spinelli D. Fatigue behavior of friction stir spot welding and riveted joints in an Al alloy // Procedia Engineering. 2010, V. 2. P. 1815–1821.

9. Масленников А.В., Ерофеев В.А. Физико-математическая модель сварки трением с перемешиванием // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Выпь. 10, С. 64–73.

10, Охапкин К.А. Расчетно-теоретический анализ тепловых процессов при точечной сварке трением // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Наука и образование. 2012. – №1. – С.172–176.

11. Трение и антифрикционные материалы: учебное пособие / М. А. Филиппов, О. Ю. Шешуков; М-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021 – 204 с.

12. Вилль В.И. Сварка металлов трением. Л. : Машиностроение. 1970, 176 с.

Мамедов Дж.
заведующий кафедрой. «Автоматика и механика»
Сумгаитский государственный университет
Азербайджан, Сумгаит
cavan62@mail.ru
Сулейманова Н.
доцент кафедры «Автоматика и механика»
Сумгаитский государственный университет
Азербайджан, Сумгаит
Мустафаева Н.
преподователь кафедры «Автоматика и механика»
Сумгаитский государственный университет
Гулиева Х.
старший преподователь кафедры «Автоматика и механика»
Сумгаитский государственный университет
Азербайджан, Сумгаит

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦЕЗИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального и теоретического исследования прецизионных материалов метрологического оборудования, изготовленных с применением нанотехнологических методов. Основное внимание уделено обеспечению надежности и долговечности прецизионных элементов, функционирующих в условиях машиностроительного производства. Для комплексной оценки эксплуатационных характеристик разработан и применён математический аппарат, включающий модели износа и трения, теплового поведения и коррозионных процессов.

Экспериментальные исследования выполнены на основе сравнительного анализа классических и нанотехнологических материалов. Показано, что использование наноструктурированных покрытий приводит к существенному снижению коэффициента трения и

скорости износа, а также обеспечивает более стабильные характеристики при повышенных нагрузках и температурах. Полученные результаты подтверждены расчетами с использованием динамических математических моделей, учитывающих изменение давления, скорости и температурных режимов во времени.

Отдельное внимание уделено оценке тепловой и коррозионной стойкости материалов прецизионных деталей. Установлено, что наноматериалы обладают повышенной тепловой стабильностью и меньшей склонностью к коррозии по сравнению с традиционными материалами, что способствует увеличению ресурса работы метрологического оборудования и снижению погрешностей измерений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации высокоточного метрологического оборудования на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: метрологическое оборудование, прецизионные материалы, нанотехнологии, математическое моделирование, износ и трение, тепловые процессы, коррозионная стойкость, надежность.

Mamedov J.
Head of the Department of Automation and Mechanics
Sumgayit State University
cavan62@mail.ru
Azerbaijan, Sumgai
Suleymanova N.
Associate Professor, Department of Automation and Mechanics
Sumgayit State University
Azerbaijan, Sumgai
Mustafayeva N.
Lecturer, Department of Automation and Mechanics
Sumgayit State University
Azerbaijan, Sumgai
Guliyeva Kh.
Senior Lecturer, Department of Automation and Mechanics
Sumgayit State University
Azerbaijan, Sumgai

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PRECISION MATERIALS FOR METROLOGICAL EQUIPMENT BASED ON NANOTECHNOLOGICAL METHODS

Abstract. The article presents the results of an experimental and theoretical study of precision materials for metrological equipment manufactured using nanotechnology-based methods. Particular attention is paid to ensuring the reliability and durability of precision components operating in a machine-building production environment. To comprehensively evaluate operational characteristics, a mathematical framework was developed and applied, incorporating models of wear and friction, thermal behavior, and corrosion processes.

Experimental studies were conducted based on a comparative analysis of conventional and nanotechnology-based materials. It was demonstrated that the use of nanostructured coatings leads to a significant reduction in the friction coefficient and wear rate, while also ensuring more stable performance characteristics under elevated loads and temperatures. The results were confirmed by calculations using dynamic mathematical models that account for time-dependent variations in pressure, speed, and temperature conditions.

Particular attention is paid to evaluating the thermal and corrosion resistance of materials used for precision components. It has been established that nanomaterials exhibit superior thermal stability and a lower susceptibility to corrosion compared to conventional materials; this contributes to extending the service life of metrological equipment and reducing measurement errors. The findings can be applied in the design and operation of high-precision metrological equipment at manufacturing enterprises.

Keywords: metrological equipment, precision materials, nanotechnology, mathematical modeling, wear and friction, thermal processes, corrosion resistance, reliability.

Для обеспечения высокой надежности и стабильности функционирования прецизионных деталей метрологического оборудования на машиностроительном предприятии, внедряющем нанотехнологические методы производства, необходима разработка и применение адекватной математической модели. Такая модель служит инструментом формализованного описания процессов, протекающих в элементах измерительного оборудования, и позволяет проводить количественный анализ их поведения в различных режимах эксплуатации [1, 2].

Математическое моделирование обеспечивает возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик оборудования, выявления критических факторов, влияющих на точность и долговечность прецизионных деталей, а также оптимизации конструктивных и технологических параметров на этапе проектирования [3]. Особое значение модель приобретает в условиях применения нанотехнологий, поскольку при уменьшении характерных размеров элементов существенно возрастает роль микроскопических и субмикроскопических эффектов, таких как структурная неоднородность материала, поверхностные явления и размерные эффекты.

Разрабатываемая модель ориентирована на комплексную оценку свойств материалов, включая их микроструктурные параметры (размер зерен, распределение дефектов кристаллической решетки, состояние поверхностных слоев), а также макроскопические механические характеристики, такие как упругость, прочность, износостойкость и устойчивость к деформации. Учет взаимосвязи между микроскопическими свойствами и механическим поведением материала [4, 5] позволяет более точно описывать процессы деградации и износа прецизионных деталей в процессе эксплуатации.

Таким образом, построение математической модели является ключевым этапом в обеспечении надежности метрологического оборудования, так как она создает научно обоснованную основу для повышения точности измерений, увеличения ресурса работы оборудования и снижения вероятности отказов в условиях высокоточных и наукоемких производственных процессов.

Основной математической моделью для этой цели будем использовать модель трения и износа, модель распределения температуры и модель коррозии метрологического оборудования, применяемая на машиностроительном заводе [6]. Модель износа и трения прецессионных деталей является

одним из основных факторов, определяющих надежность этих деталей в течение длительного периода эксплуатации. Для повышения надежности этих деталей с учетом коэффициента трения и износостойкости материалов, обработанных с помощью нанотехнологий, используется следующее математическое выражение [7]:

$$\frac{dV}{dt} = k\sigma v \quad (1)$$

где dV – скорость износа детали (см³/с); k – коэффициент износа (основанный на свойствах нанотехнологического материала); σ – нагрузка (Н/м²); v – скорость движения (м/с).

Используемая модель оценивает скорость износа материала метрологическое оборудования и эффекты трения в условиях его эксплуатации. Входными параметрами для экспериментального исследования являются: $\sigma = 5\times10^{6}$ Н/м²; $v = 0{,}01$ м/с; k_1 (классический) $= 1\times10^{-6}$; k_2 (нано) $= 3\times10^{-7}$.

Для экспериментальной оценки показателей процесса износа материала составлены таблица 1 и график в соответствии с временными рядами для классических и нанотехнологических материалов (рис. 1).

Таблица 1

Экспериментальная оценка показателей процесса износа материала

Время t(c)	Объём износа для классического материала (см³)	Объём износа – нанотехнологического материала (см³)
0	0,0000	0,0000
100	0,0050	0,0015
200	0,0100	0,0030
300	0,0150	0,0045
400	0,0200	0,0060
500	0,0250	0,0075
600	0, 0300	0,0090
700	0,0350	0,0105
800	0, 0400	0,0120
900	0,0450	0,0135
1000	0,0500	0,0150

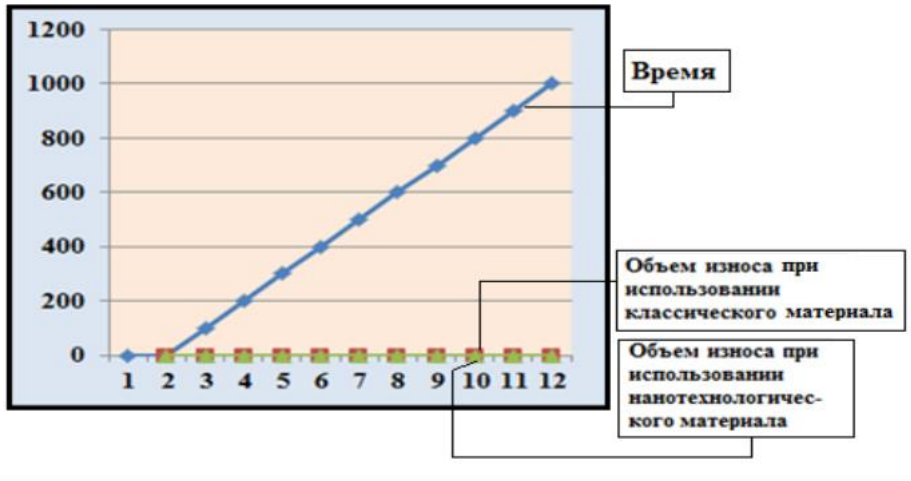


Рис. 1. График экспериментальной оценки процесса износа материала метрологического оборудования

Коэффициент трения:

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} \tag{2}$$

Здесь μ – коэффициент трения; F_f – сила трения; F_n – нормальная сила.

Согласно выражению (2)**, о**пределена зависимость силы трения от нормальной нагрузки:

$$F_f = \mu F_n$$

Для экспериментального исследования **вводятся следующие входные параметры:** $\mu_к$= 0,35 (коэффициент трения классического материала), $\mu_н$ = 0,12 (коэффициент трения наноматериала).

Для экспериментальной оценки показателей процесса **трения** материала построены таблица 2 и график в зависимости от времени для классических и нанотехнологических материалов (рис. 2).

Таблица 2

Экспериментальная оценка показателей процесса трения материала

Нормальная сила F_n (Н)	Сила трения – классического материала F_f (Н)	Сила трения – нанотехнологического материала F_f (Н)
10	3.5	1.2
20	7.0	2.4
30	10, 5	3.6
40	14.0	4.8
50	17.5	6.0
60	21.0	7.2
70	24.5	8.4
80	28.0	9.6
90	31.5	10, 8
100	35.0	12.0

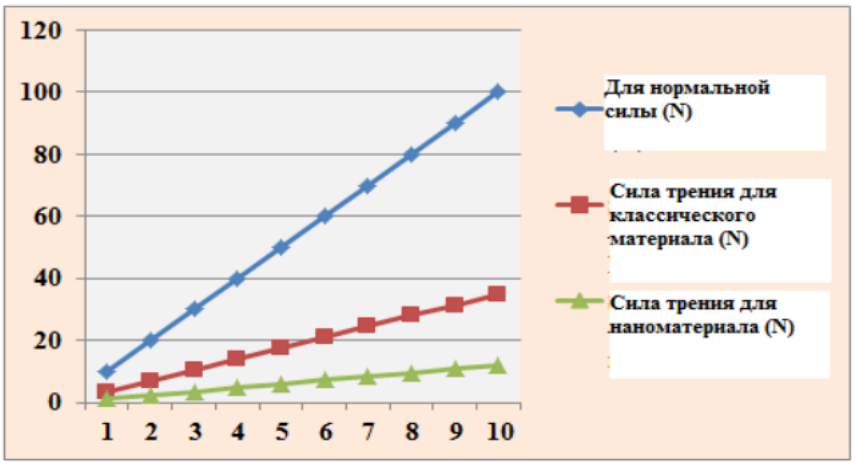


Рис. 2. Экспериментальные графики показателей процесса ***трения*** *материала метрологического оборудования*

Анализ экспериментальных таблиц показывает, что объем износа материалов, обработанных нанотехнологическими методами, увеличивается со временем значительно меньше, чем у классических материалов. За 1000 сек. работы объем износа уменьшается примерно в 3 раза. Сравнение сил трения доказывает, что коэффициент трения на поверхностях с нанопокрытием значительно ниже и остается стабильным при увеличении нагрузки [8]. Эти факторы приводят к повышению надежности прецессионных деталей метрологического оборудования.

Метрологическое оборудование с использованием нанотехнологий оказывает положительное влияние на повышение надежности обрабатываемых деталей, поскольку коэффициент трения в материалах снижается [9]. Для разработки такой модели можно использовать динамические математические уравнения, учитывающие изменяющиеся во времени эффекты [10]. Например, скорость износа детали может меняться со временем, поскольку скорость износа изменяется с каждым последующим увеличением давления и скорости. Для таких моделей используются следующие уравнения:

$$V(t) = V_0 + \int_0^t k\,\sigma(t)\,v(t)\,dt \qquad (3)$$

где $V(t)$ – общее изменение объема износа; V_0 – начальный износ (предполагается износ, наблюдаемый в первых циклах); t – время (с).

В модели износа используется несколько практических подходов для **учета изменяющихся условий эксплуатации. Главная цель** – корректно выразить изменяющиеся во времени давление $\sigma(t)$ и скорость $v(t)$.

Согласно подходу стационарных режимов, рабочий процесс делится на режимы низкой, средней и высокой нагрузки. Здесь для каждого режима σ_i, v_i и время Δt_i принимаются постоянными. Этот метод чаще всего используется для экспериментальных данных, основанных на дискретных измерениях. Время делится на небольшие шаги. Значения $\sigma(t_j)$ и $v(t_j)$, измеренные датчиками, непосредственно включаются в расчет. Если изменение режима

является регулярным, то происходит линейный рост, которая записывается в виде:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + at, v(t) = v_0 + bt \quad (4)$$

периодическое изменение

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 \sin(\omega t) \quad (5)$$

Здесь σ_0, v_0 – соответственно начальное давление и скорость; a, b – коэффициенты роста.

В этом случае интеграл в выражении (3) вычисляется аналитически. При переходах между режимами учитываются показатели ускорения и нагрузки. Для $\sigma(t)$ и $v(t)$ выбираются гладкие функции, а коэффициент износа k также принимается зависящим от режима, т.е. $k=k(\sigma, v)$. В результате можно отметить, что для получения переменных режимов работы целесообразно разделить процесс на режимы и выполнить поэтапно-линейные вычисления или вычислить интеграл, задав $\sigma(t)$ и $v(t)$ как функцию времени.

Если подставить функции (4) и (5) в выражение (3), получим следующую формулу:

$$V(t) = V_0 + k \int_0^t (\sigma_0 + at)(v_0 + bt)dt \quad (6)$$

Когда начинается сбор урожая

$$(\sigma_0 + at)(v_0 + bt) = \sigma_0 v_0 + (\sigma_0 b + v_0 a)t + abt^2 \quad (7)$$

Затем, в результате интегрирования, получаем следующее выражение:

$$V(t) = V_0 + k\left[\sigma_0 v_0 t + \frac{(\sigma_0 b + v_0 a)t^2}{2} + \frac{abt^3}{3}\right] \quad (8)$$

Для оценки процесса износа метрологического прибора также приведены экспериментальные данные**:** начальный износ – V_0 = 0,02 мм³; коэффициент износа – $k = 2\times10^{-1}$ Па; временной интервал – t = 1000 с.

Выражение (4) используется для определения изменения давления в зависимости от времени t. Здесь σ_0 =50 МПа, a =0,02 МПа/с. Выражение (5) используется для оценки процесса изменения скорости со временем. Здесь v_0 =0,5 м/с, b =0,0005 м/с^2.

При вводе вышеуказанных входных данных в формулу (8) получается следующее значение: $V(t)$ = 0,02009 мм^3. Входные данные, введенные в показатель степени и полученные значения k σ v Δt показаны в таблице 3.

Таблица 3

Входные данные, введенные в показатель степени и полученные значения *k σ v Δt*

№	$\tau_и$ (с)	σ (t_i) (МПа)	v(t_i) (м/с)	k σ v Δ t (мм³)	V(t_i) (мм³)
0	0	50,0	0,50	–	0,02000
1	100	52,0	0,55	$5{,}72\times 10^{-6}$	0,02001
2	200	54,0	0,60	$6{,}48\times 10^{-6}$	0,02002
3	300	56,0	0,65	$7{,}28\times 10^{-6}$	0,02003
4	400	58,0	0,70	8.12×10^{-6}	0,02004
5	500	60,0	0,75	9.00×10^{-6}	0,02005
6	600	62,0	0,80	$9{,}92\times 10^{-6}$	0,02006
7	700	64,0	0,85	$1{,}09\times 10^{-5}$	0,02007
8	800	66,0	0,90	$1{,}19\times 10^{-5}$	0,02008
9	900	68,0	0,95	$1{,}29\times 10^{-5}$	0,02009
10	1000	70,0	1,00	$1{,}40\times 10^{-5}$	0,02009

В таблице 3 показано накопление износа с учетом изменения давления и скорости с дискретным временным шагом. Результаты расчетов также подтверждают нелинейное увеличение объема износа со временем на графике (рис. 3).

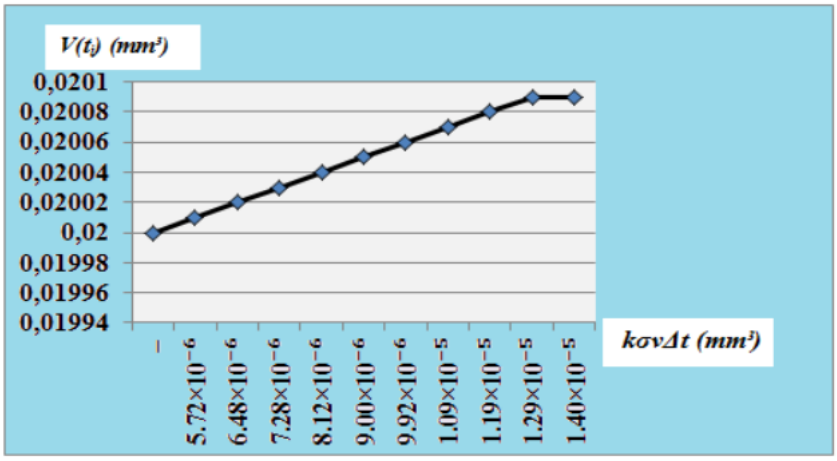


Рис. 3. Нелинейный график изменения объема износа во времени

В связи с повышенной стабильностью наноматериалов при высоких температурах, важно оценить поведение материалов в таких условиях. Для моделирования теплового поведения рассчитываются **теплопроводность** и **тепловая диффузия. При этом используется уравнение рассеивания тепла**:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T, \qquad (9)$$

где T – температура (°C); t – время (с); α – коэффициент тепловой диффузии (м²/с); $\nabla^2 T$ – вторая производная температуры, т.е. распределения тепла.

Это уравнение позволяет оценить скорость теплопередачи и термическое напряжение материала. Проведем эксперимент для оценки поведения метрологического оборудования, используемого в производственном процессе, в зависимости от теплового режима. Затем для оценки надежности работы нанотехнологических материалов метрологического оборудования в тепловом режиме, показатели теплового поведения в зависимости от высоких температур представлены в таблице 4.

Таблица 4

Показатели теплового поведения в зависимости от высоких температур

№ измерения	Время, *m (c)*	Температура, *T (°C)*	Температурный градиент, *∇ T (°C/м)*	Коэффициент тепловой диффузии, *α (м²/с)*	Примечание
1	0	25	0	0,000012	Исходная ситуация
2	60	100	15	0,000013	Стабильный рост
3	120	200	28	0,000013	Стабильная наноструктура
4	180	300	35	0,000014	Минимальное тепловое напряжение
5	240	400	40	0,000015	Высокая износостойкость

В таблице 4 отражаются следующие показатели: t – момент измерения температуры; T – фактическая температура материала; ∇T – разница температур внутри материала; α – коэффициент тепловой диффузии, рассчитанный на основе уравнения Фурье. Согласно таблице 4 построен экспериментальный график зависимости температуры от времени (рис . 4).

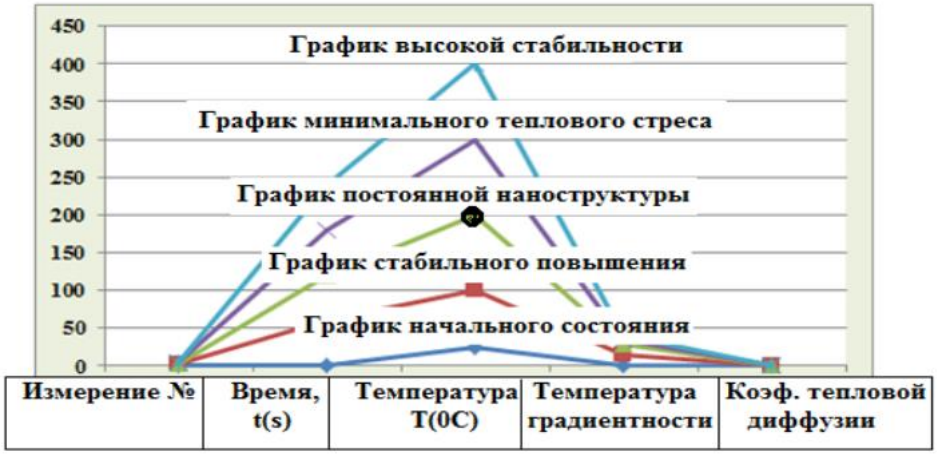


Рис. 4. Экспериментальный график зависимости температуры прецизионной части метрологического оборудования от времени .

Коррозионная стойкость материала метрологического оборудования также очень важна при длительной эксплуатации деталей, подверженных

коррозионному воздействию. Для моделирования процессов коррозии используются уравнение Нернста и законы Фарадея .

Ток коррозии:

$$I = k\ A\ (E_{corr} - E) \quad (10)$$

Здесь I – ток коррозии (А); k – коэффициент скорости коррозии; A – площадь поверхности (м²); E_{corr} – потенциал коррозии (В); E – внутренний потенциал (В).

Данная модель основана на разработке метрологического оборудования с использованием нанотехнологий. Он оценивает коррозионную стойкость материалов и обеспечивает надежность при длительной эксплуатации.

Для изучения процесса коррозии прецессионной части метрологического оборудования были получены экспериментальные данные для различных материалов прецессионных элементов (табл. 5).

Таблица 5

Экспериментальные данные для изучения процесса коррозии прецессионной части метрологического оборудования

№	Тип материала	Площадь поверхности *A (м²)*	Коррозия потенциали, $E_{корр}$ *(В)*	Внутренний потенциал, *E(В)*	Коррозия коэффициент скорости излучения *k*	Температура (°*C*)	Время *(часы)*	Расчетный ток коррозии, *(I)*
1	Нержавеющая сталь	0,0025	0,45	0,30	0,012	25	24	0,0000 45
2	Алюминиевый сплав	0,0025	0,60	0,35	0,018	25	24	0,000011
3	Бронза	0,0025	0,50	0,40	0,1510	25	24	0,0000 38

Согласно таблице 5, экспериментальным показателям процесса коррозии прецессионной части метрологического оборудования и в зависимости от типа материала, построены графики (рис. 5). Предложенные математические модели и экспериментальные результаты (табл. 1–5, рис. 1–5) рассматриваются как важный инструмент обеспечения надежности прецизионных деталей метрологического оборудования на машиностроительных предприятиях с использованием нанотехнологических методов. Разработка модели обеспечивает высокоточную работу и долговременную надежность каждой детали. С помощью моделирования можно выбрать оптимальные решения для различных материалов метрологического оборудования и условий их эксплуатации.

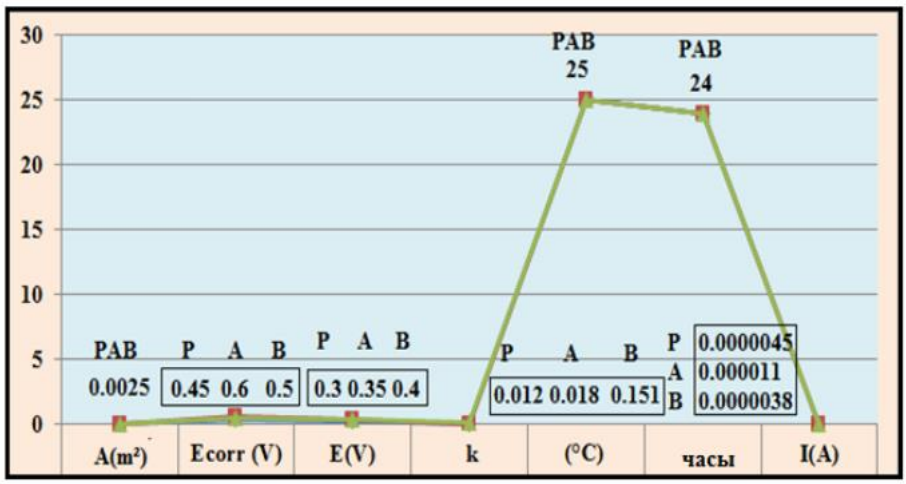


Рис. 5. График экспериментальных показателей процесса коррозии материалов прецессионной части метрологического оборудования (состоящих из стали (Р), алюминия (А), бронзы (В))

Исследования показали, что надежность прецессионных элементов метрологического оборудования для машиностроительных предприятий имеет решающее значение для точности и стабильности измерительных систем. Такие факторы, как износ, трение, перепады температуры и коррозия во время эксплуатации, негативно влияют на функциональные свойства этих элементов и приводят к увеличению погрешностей измерений.

Применение нанотехнологических методов позволяет эффективно решать эти проблемы. Наноструктурированные покрытия и наноматериалы повышают механическую прочность прецизионных деталей, снижают трение и продлевают срок их службы. При этом применяемые в статье методы обеспечивают долговременную стабильность точности измерений, повышая надежность метрологического оборудования. Обеспечение надежности прецессионных деталей с использованием нанотехнологических методов рассматривается как перспективное направление для будущих исследований и практических применений, являющееся одновременно технически и экономически эффективным.

Список литературы

1. Иванов Ю.П. Информационно-статистическая теория измерений. Модели сигналов и анализ точности систем: учебник / Ю.П. Иванов, Б.Л. Бирюков. – СПб .: ГУАП, 2008. – 160 с.

2. Иванов Ю.П. Комплексирование информационно-измерительных приборов летательных аппаратов. Учебное пособие для узов / Ю.П. Иванов ., А.Н. Синяков, И.В. Филатов. – Л.: Машиностроение, Ленинград. кафедра – 1984. – 207 с.

3. Виноградова Н.А., Гайдученко В.В., Карякин А.И. Основы построения информационно-измерительных систем: руководство по системной интеграции. М: Изд. МЭИ, 2004. 268 с.

4. Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Выбор приемника излучения при проектировании оптико-электронного устройства: учебный . пособие. М: Изд-во МИИ-ГАиК, 2017. 58 с.

5. Р.А. Алиев, М.А. Ахмедов, Д. Ф. Мамедов, А. Г. Гусейнов. Создание инструмента для автоматизированного проектирования нестандартных элементов гибкой производственной системы. Автоматизация и современные технологии, № 1, 2010, – с. 28–32.

6. Точность методов и результатов измерений. Часть 6. Применение определений точности на практике: СТБ ИСО 5725–6–2002. – Введ. 01.07.2003. – Минск: Госстандарт: Белорус. Институт стандартизации и сертификации, 2000, – 50 с .

7. Тодуа, П. А. Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и наноиндустрии / П. А. Тодуа // Измерительное оборудование. – 2008. – № 5. – с. 5–21.

8. Волк, Ч. П. Измерение линейных размеров рельефных элементов микро- и наноструктур на растровых электронных микроскопах высокого и низкого напряжения / И. П. Волк [и др.] // Измерительное оборудование. – № 1. 2009. – с . 15–17 .

9. Кирин И. Г. Специальные радиационно-стойкие волоконно-оптические и оптоэлектронные датчики и системы. М.: Университет. к н., 2008.148 с.

10, Александров В.С., Собенин А.П. Работы ВНИИМ им. Д.И. Менделеева по метрологическому обеспечению нанотехнологий, Мир стандартов, ул. 6 – 10, № 5(16), 2007.

11. Мамедов Д. Ф. Разработка структуры программного интерфейса комплексного автоматизированного проектирования технических систем. Вестник компьютерных и информационных технологий, № 5, 2013.- с. 18–21.

Киселев В.Е.
генеральный директор
ООО «ИТЦ «ЛазерТех»
Россия, Москва
v.kiselev@itclt.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru
Смирнов С.В.
к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
smirsj@yandex.ru
Ливитин В.Р.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
livitinvlad8@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАХЛЕСТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА 1565ЧМ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния ключевых параметров режима лазерной сварки на глубину проплавления и механические характеристики нахлесточных соединений, полученных из пакета листов сплава 1565чМ толщиной

1,0 мм. В ходе эксперимента определён оптимальный режим сварки, обеспечивающий достижение максимального разрушающего усилия на срез.

Ключевые слова: сплав 1565чМ, нахлесточное соединение, лазерная сварка, глубина проплавления, усилие на срез, параметры режима.

Kiselev V.E.
General Director
ETC LaserTech LLC
Russia, Moscow
v.kiselev@itclt.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru
Smirnov S.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
smirsj@yandex.ru
Livitin V.R.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
livitinvlad8@gmail.com

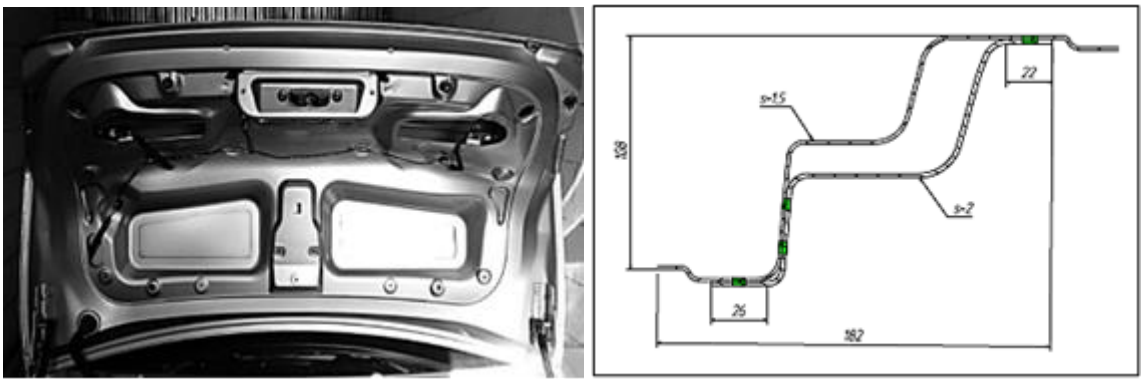
INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF LAP JOINTS OF ALLOY 1565chM PERFORMED BY LASER WELDING

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of the key parameters of the laser welding mode on the penetration depth and mechanical characteristics of lap joints obtained from a package of 1565chM alloy sheets with a thickness of 1.0 mm.

Keywords: 1565chM alloy, lap joint, laser welding, penetration depth, shear force, mode parameters.

Стремясь улучшить характеристики автомобилей, отрасль активно внедряет передовые материалы. Особое внимание уделяется высокопрочным алюминиевым сплавам, отличающимся исключительным сочетанием лёгкости, прочности и устойчивости к коррозии. Ключевым преимуществом элементов из этих сплавов, применяемых в автомобильном строительстве, является их высокая перерабатываемость [1–4].

В последние годы в автомобильной промышленности наблюдается тенденция к применению алюминиевых сплавов при изготовлении навесных элементов кузова – капота, дверей и крышки багажника (рис. 1а). Упомянутые детали состоят из обшивки и усилителя, соединяемых между собой нахлесточным сварным соединением (рис. 1б). При сварке не допускается появление проплава на поверхности обшивки.



а *б*

Рис. 1. Конструкции капота автомобиля (а) и типовое нахлесточное соединение (б) навесных деталей кузова автомобиля

Для получения качественных сварных швов нахлесточных соединений при изготовлении навесных деталей кузова автомобиля из алюминиевых сплавов перспективно применение лазерной сварки.

Цель данной работы – исследовать влияние параметров режима лазерной сварки на глубину проплавления, структуру и прочность на срез нахлесточных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 1 мм.

Для исследований использовали листы сплава 1565чМ толщиной 1,0 мм в отожженном состоянии. Химический состав исследуемого сплава и его механические свойства приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав листов из сплава 1565чМ

Марка сплава	Массовая доля элементов,%									
	Al	Mg	Mn	Be	Zr	Cu	Zn	Cr	Fe + Si	Прочие примеси, сумма
1565ч	Осн.	5,75	0,76	0,0005	0,09	0,07	0,55	0,06	0,2 + 0,12	0,10

Таблица 2

Механические свойства листов из сплава 1565чМ толщиной 1 мм

Свойства	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, МПа
Фактические	335–350 345	185–220 200	17,5–21,5 19,5

Сварку нахлесточных соединений листов сплава 1565чМ толщиной 1,0 мм проводили с закреплением деталей в зажимах без зазора между ними. Обработка поверхности перед сваркой не производилась. Сварку выполняли в направлении прокатки листа.

В таблице 3 приведены режимы лазерной сварки, используемые при выполнении исследований. Защита шва от окисления обеспечивалась подачей аргона струйным способом через сопло сварочного пистолета при расходе 3–5 л/мин. В качестве защитного газа применялся аргон высшего сорта UN 1066 Аргон 2.2 (производитель – ООО «Вектор»). Сварочные работы проводились без использования присадочной проволоки.

Таблица 3

Параметры режима лазерной сварки образцов нахлесточных соединений

Параметры	Номер режима лазерной сварки			
	1	2	3	4
Оборудование	LightWELD XC 1500	LightWELD XC 1500	LightWELD XR 1500	LightWELD XR 1500
Диаметр рабочего лазерного пятна, мкм	150	150	60	60
Мощность, Вт	750	900	350	550
Фокусное расстояние, мм	0	0	0	0
Скорость сварки, мм/мин	760	1700	760	1200
Ширина осцилляции, мм	1,5	1,5	1,5	1,5
Частота осцилляции, Гц	80	100	100	100

Испытания механических характеристик нахлесточных соединений на срез проводились на универсальной испытательной машине Walter + Bai AG LFM 400 kN по стандарту ГОСТ 6996–66. В качестве образцов использовались пластины шириной 20 мм и длиной 100 мм с сварным швом, размещённым в центре нахлестки (20 мм).

Для исследования структуры сварных соединений и глубины проплавления нижнего листа пакета использовали световые микроскопы Observer A1m, Carl Zeiss и G-51 Olympus.

Химическое травление образцов для выявления макроструктуры и микроструктуры точечных соединений алюминиевого сплава 1565чМ проводили раствором Келлера (HF – 1 мл, HCl –1,5 мл, HNO_3 – 2,5 мл, H_2O – 95,0 мл) и раствором, состоящего из реактива Пултона (HF – 2 мл, HCl – 3 мл, HNO_3 – 20 мл, H_2O – 175 мл), HNO_3 – 50 мл, H_2O – 40 мл, CrO_3 – 12 г.

Внешний вид швов, выполненных при режиме 4, приведён на рисунке 2. Анализ результатов формирования нахлесточного соединения пакета из листов сплава 1565чМ показал, что при всех исследованных режимах отсутствует сквозное проплавление нижнего листа, что недопустимо с точки зрения обеспечения выхода шва на поверхность пакета, подлежащего последующей покраске.

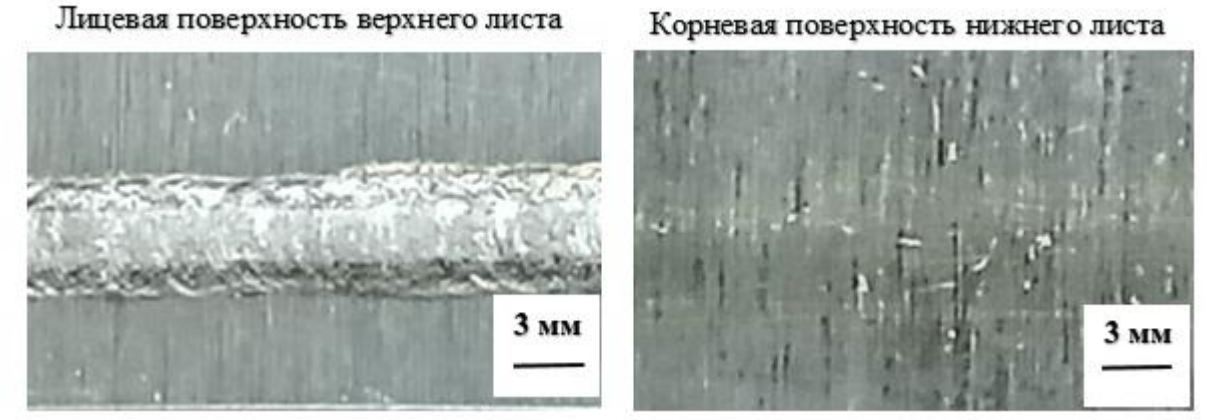


Рис. 2. Нахлесточное соединение листов сплава 1565чМ с лицевой и корневой стороны соединения, выполненное на режиме 4 (таблица 3)

Результаты испытаний на срез (сдвиг) нахлесточных сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненные на различных режимах, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты испытаний на сдвиг нахлесточных соединений листов сплава 1565чМ

Разрушающее усилие на срез (сдвиг) $P_{ср}$, кН			
Номер режима			
1	2	3	4
0,57–5,94 2,66	1,66–5,48 3,56	2,58–4,88 4,31	3,36–5,58 5,12

По результатам анализа данных, представленных в таблице 4, отмечается, что наибольшие показатели разрушающего усилия при сдвиге характерны для образцов сварных соединений, изготовленных при режиме 4. Что касается режима 1, то здесь наблюдается значительный разброс значений разрушающего усилия. В таблице 5 указана величина соотношения максимального и минимального показателей усилия сдвига у сварных соединений.

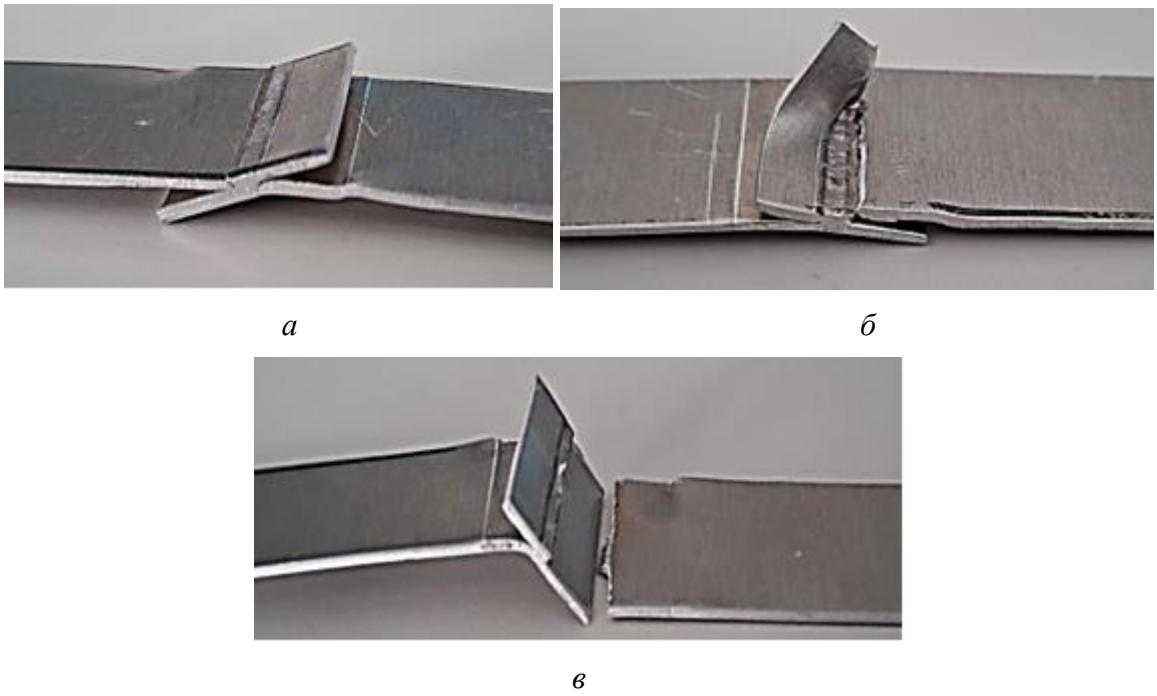
Таблица 5

Соотношение между максимальным и минимальным значением разрушающего усилия на сдвиг сварных соединений листов сплава 1565чМ

Параметр	Номер режима			
	1	2	3	4
Максимальное разрушающее усилие на сдвиг, кН	5,94	5,48	4,88	5,58
Минимальное разрушающее усилие на сдвиг, кН	0,57	1,66	2,58	3,36
Соотношение максимального и минимального усилия на сдвиг	10,42	3,30	1,89	1,66

Из таблицы 5 следует, что наибольшая стабильность режимов по величине разрушающего усилия сдвига нахлесточного соединения соответствует режимам сварки 3 и 4.

На рисунке 3 представлен характер разрушения нахлесточных сварных соединений при испытаниях на сдвиг (срез).



а *б*

в

Рис. 3. Разрушение образцов сварных соединений при испытаниях: а – наиболее часто встречающееся разрушение; б – отрыв верхнего листа по границе шва; в – разрушение по основному металлу

На рисунке 3, а показан внешний вид разрушения образца сварного соединения, выполненного по режиму 3, который характерен для данного режима и встречается наиболее часто. При таком типе разрушения величина усилия, вызывающего разрушение при сдвиге, остаётся достаточно стабильной и составляет значение, близкое к среднему показателю для указанного режима сварки.

При проведении испытаний на сдвиг зафиксированы два типа разрушения, представленные на рис. 3, б, в. Один из них (рис. 3б) характеризовался отрывом основного металла по зоне сплавления шва. Второй механизм (рис. 3в) проявлялся в разрушении соединения в пределах основного металла. Оба указанных механизма разрушения наблюдались у образцов сварных соединений при испытаниях, выполненных в режиме сварки 4.

На рисунке 4 представлена макроструктура сварных соединений листов сплава 1565чМ, полученных на различных режимах сварки.

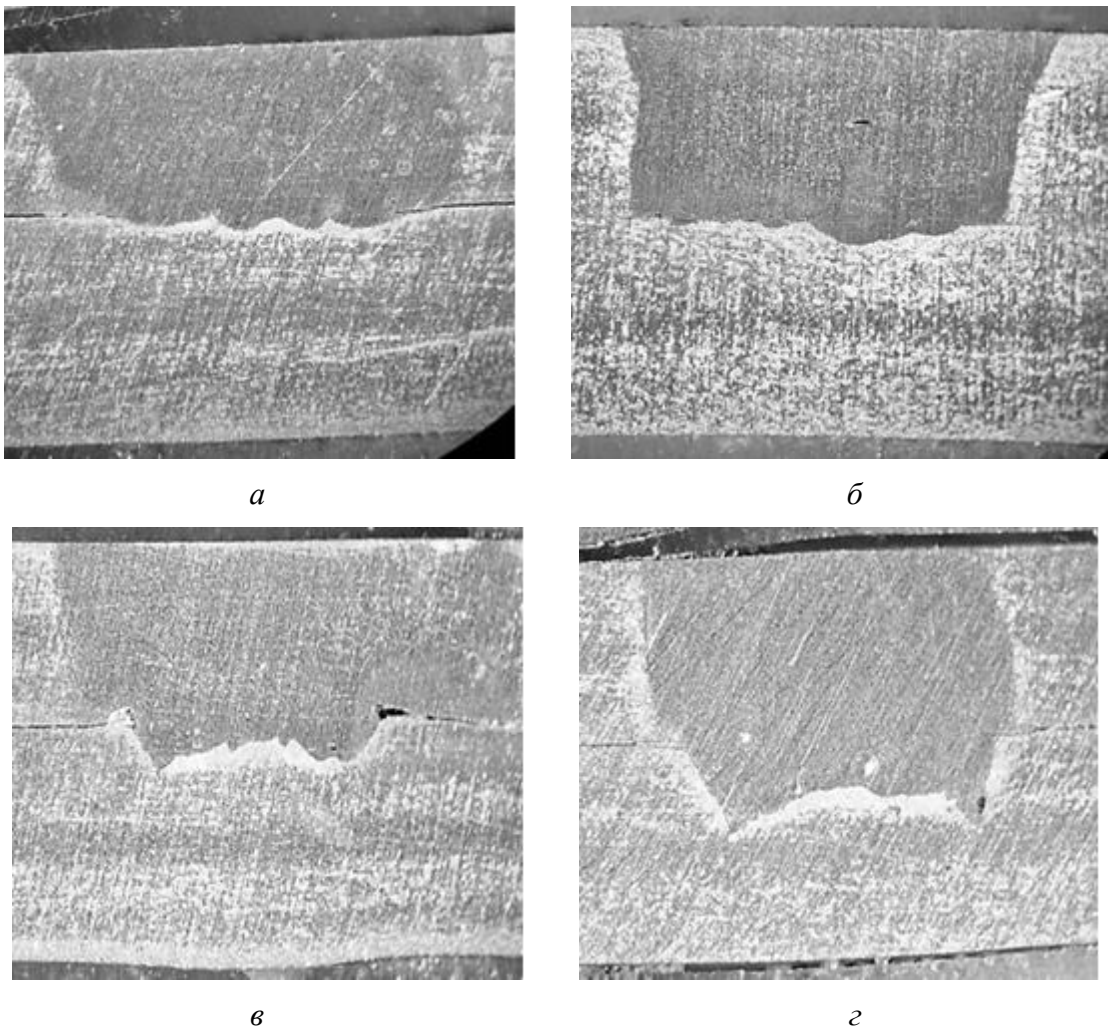


Рис. 4. Макроструктура нахлесточных сварных соединений листов сплава 1565чМ, выполненных на разных режимах:
а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4

Из анализа макроструктуры соединения, зафиксированного в режиме 1, следует, что верхний лист полностью проплавлен (рис. 4а). При этом глубина проплавления изменяется по волнообразному закону, при этом максимальная глубина проплавления нижнего листа составляет 0,05–0,11 мм. Макроструктура шва дефектов, таких как поры, не выявила.

Режим 2 обеспечивает более стабильное проплавление нижнего листа на глубину 0,12–0,17 мм. При этом режиме колебания глубины проплавления снижены (рис. 4б). Как и в случае с режимом 1, в макроструктуре шва дефектов в виде пор выявлено не было.

Режим 3 обеспечивает большее проплавление нижнего листа по сравнению с режимами 1 и 2, при этом глубина проплавления колеблется в пределах 0,15–0,22 мм. Отметим, что на участках, прилегающих к краям шва, глубина проплавления выше, чем в его центральной зоне. Выявлен дефект в виде полости, образовавшейся в зоне стыка металла шва и основного металла, причём её основание расположено на границе соприкосновения по-

верхностей свариваемых листов (рис. 4в). Учитывая, что обработка контактирующих поверхности листов перед лазерной сваркой не проводилась, наиболее вероятной причиной появления полости является разложение гидратированной влаги в оксидной плёнке, присутствующей на поверхности листов.

Наибольшую прочность при разрыве при швейном срезе показала лазерная сварка пакета листов в режиме 4. На изображении макроструктуры (рис. 4г) отмечается, что глубина проплавления нижнего листа на краях шва составляет 0,42–0,45 мм, тогда как в центральной зоне – 0,27–0,31 мм. Дефекты в виде пор и полостей в металле шва не зафиксированы.

Можно также отметить, что при использовании всех исследованных режимов лазерной сварки выхода проплава на нижнюю поверхность нижнего листа не происходило.

Обобщая полученные результаты исследования макроструктуры соединений и механических испытаний образцов сварных соединений на срез, следует оптимальным признать режим сварки 4: диаметр рабочего лазерного пятна 60 мкм; мощность лазерного излучения 550 Вт; скорость сварки 1200 мм/мин; ширина осцилляции 1,5 мм; частота осцилляции 100 Гц.

Список литературы

1. Фридляндер И. Н., Сандлер В. Г., Грушко О. Е. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 9. С. 3–9.

2. Новый сплав системы Al–Mg–Si / В.Ф. Шамрай, О.Е. Грушко, Л.М. Шевелева, В.Д. Самсонов // Перспективные материалы. 2004. № 5. С. 16–22.

3. Влияние кальция на анизотропию механических свойств листов алюминиевого сплава типа «авиаль» / М.А. Гуреева, О.Е. Грушко, В.В. Овчинников, Г.Г. Клочков // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 5. С. 21–27.

4. Киселев В.Е., Овчинников В.В. Алюминиевые сплавы для деталей кузова автомобиля. // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Том. 23. №10, С.472–482. DOI: 10, 36652/1684-1107-2025-23-10-472-482.

Новоселов Р.А.
менеджер по продажам
ООО «Ф-Сервис»
Россия, Москва
novroman01@ya.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1565ЧН2 ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования усталостной долговечности термически неупрочняемого алюминиевого сплава 1565чН2 (Al–Mg система) после различных методов поверхностного упрочнения. Рассмотрены два основных технологических приёма: виброударная обработка керамическими чипсами и фрикционная обработка поверхности (по аналогии со сваркой трением с перемешиванием). В работе приведены режимы обработки, схемы проведения экспериментов, а также результаты металлографических и механических испытаний, включая оценку микротвёрдости, среднего размера зерна и усталостной долговечности образцов. Показано, что фрикционная обработка обеспечивает более стабильные и высокие показатели усталостной долговечности по сравнению с виброударной обработкой, а также способствует измельчению зерна и формированию специфической микроструктуры в зоне упрочнения. Установлено, что характер разрушения образцов после фрикционного упрочнения изменяется, что открывает возможности управления усталостными характеристиками за счёт формирования определённого напряжённого состояния в поверхностном слое. Результаты подчёркивают важность выбора оптимальной технологии поверхностного упрочнения для повышения ресурса алюминиевых сплавов, применяемых в условиях переменных нагрузок.

Ключевые слова: усталостная долговечность; алюминиевый сплав 1565чН2; поверхностное упрочнение; фрикционная обработка; виброударная обработка; микроструктура; микротвёрдость.

Novoselov R.A.
Sales Manager
F-Service LLC
Russia, Moscow
novroman01@ya.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

INVESTIGATION OF FATIGUE LIFE OF 1565hH2 ALUMINUM ALLOY AFTER SURFACE HARDENING

Abstract. The article presents the results of a study of the fatigue life of thermally non-hardening aluminum alloy 1565chH2 (Al–Mg system) after various methods of surface hardening. Two main technological methods are considered: vibration shock treatment with

ceramic chips and friction surface treatment (by analogy with friction stir welding). The paper presents processing modes, experimental schemes, as well as the results of metallographic and mechanical tests, including the assessment of microhardness, average grain size and fatigue life of the samples. It is shown that friction treatment provides more stable and high fatigue life indicators compared to vibroshock treatment, and also contributes to grain grinding and the formation of a specific microstructure in the hardening zone. It has been established that the nature of the fracture of specimens after frictional hardening changes, which opens up the possibility of controlling fatigue characteristics due to the formation of a certain stress state in the surface layer. The results emphasize the importance of choosing the optimal surface hardening technology to increase the service life of aluminum alloys used under variable loads.

Keywords: fatigue life; aluminum alloy 1565chH2; surface hardening; frictional processing; vibro-percussion treatment; microstructure; microhardness.

Основным фактором повышения ресурса конструкции летательного аппарата, эксплуатация которого связана с действующими на него переменными нагрузками, является усталостная долговечность конструкционных сплавов. В монографии [1] представлен анализ усталостных испытаний алюминиевых сплавов, который показал, что повышение предела прочности алюминиевых сплавов более, чем в 2 раза (с 275 до 690 МПа) позволяет повысить предел выносливости не более, чем на 9,81–14,8 МПа для гладких образцов и практически остается неизменным для образцов с концентратором.

Следует упомянуть, что за усталостное разрушение ответственным является поверхностный слой материала. Поэтому перспективным направлением повышения усталостных характеристик алюминиевых сплавов является поверхностное упрочнение [2]. Несмотря на большой объем выполненных исследований влияния состояния поверхности на механические характеристики алюминиевого сплава, эта проблема остается актуальной и в настоящее время.

Оптимизация процесса упрочнения предполагает выбор технологической схемы, обеспечивающей обработку поверхности при минимизации экономических затрат.

В данной работе проводилась оценка следующим технологических приемов упрочнения:

– виброударная обработка керамическими чипсами;

– фрикционная обработка поверхности.

Ключевыми характеристиками технологии фрикционной обработки поверхности выступают угловая скорость вращения инструмента и его поступательная скорость движения по поверхности заготовки.

В качестве критерия оценки принята усталостная долговечность образцов с поверхностным упрочнением, выполненным по приведенным выше способам.

В ходе работы в качестве объекта изучения выступил термически неупрочняемый алюминиевый сплав 1565ч, относящийся к системе Al–Mg. Его химический состав полностью соответствует требованиям стандарта ГОСТ 4784–2019. Материал находился в полунагартованном состоянии.

Фрикционную обработку в один проход проводили на оборудовании, предназначенном для сварки трением с перемешиванием. Инструмент подводили перпендикулярно к детали вплоть до упора его фланца в обрабатываемый участок. Использовали оснастку как без стержня, так и со стержнем цилиндрической формы диаметром 4 мм, чья высота изменялась от 0 до 2 мм (см. рис. 1). Сам рабочий инструмент был выполнен из быстрорежущей стали марки Р6М5.

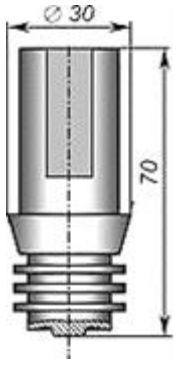


Рис. 1. Рабочий инструмент для фрикционной обработки поверхности алюминиевых сплавов

Режим фрикционной обработки: частота вращения рабочего инструмента 850 об/мин, скорость линейного перемещения 25–40 мм/мин. При обработке рабочий инструмент устанавливали под углом 0,5° вперед в направлении линейного перемещения инструмента.

До начала процедуры механической обработки с перемешиванием пластины из сплава 1565чН2 подвергались механической обработке до толщины 9 мм, при этом чистота обработки поверхности составляла Ra 0,6.

Схема фрикционной обработки поверхности алюминиевого сплава 1565чН2 представлена на рисунке 2.

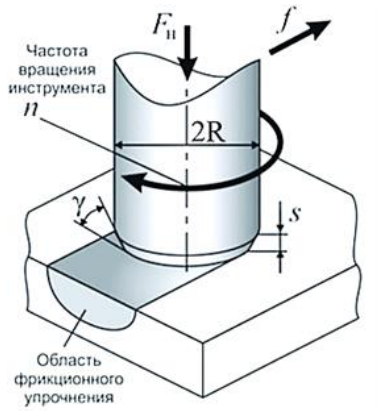


Рис. 2. Схема фрикционной обработки поверхности алюминиевого сплава 1565чН2

Исследования микроструктуры зоны обработки и анализа зеренной структуры в зоне обработки образцы подвергали травлению в растворе следующего состава: H_2O (60 мл), HNO_3 (35 мл), HF (5мл).

Макростроение зоны обработки исследуемых образцов оценивали с помощью оптического микроскопа Zeiss Axio Scope A1.

Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Melytec SM-50 с применением детектора обратно рассеянных электронов (BSE).

Влияние фрикционной обработки на механические свойства образца оценивали по изменению микротвердости его поверхностного слоя на приборе ПМТ-3М в соответствии с ГОСТ 9450–76. При этом замеры микротвердости осуществляли в поперечном сечении поверхностного слоя образца.

Плоские образцы корсетного типа были изготовлены для усталостных испытаний. Образцы шириной 40 мм имели рабочую зону шириной 20 мм. Толщина образца находилась в пределах 4±0,05 мм. Усталостные испытания образцов проводили на машине резонансного типа HFP100 фирмы Zwick/Roell Amsler (Германия) при коэффициенте асимметрии цикла нагружения R = 0,1 и частоте нагружения 45 Гц. Наиболее приемлемым значением напряжения цикла являлось 165 МПа, поскольку при этом уровне возможно ограничение наработки в 10^6 циклов. В случае отсутствия разрушения образца осуществляли переход на уровень с максимальным напряжением цикла 185 МПа и доведением образца до усталостного разрушения.

На рисунке 3 продемонстрирован внешний вид области фрикционного упрочнения сплава 1565чН2, полученная при обработке инструментом, не оснащённым пином. Отмечается присутствие в данной области типичной для процессов СТП дугообразной структуры, которая возникает вследствие контакта заплечика рабочего инструмента с поверхностью обрабатываемой детали.

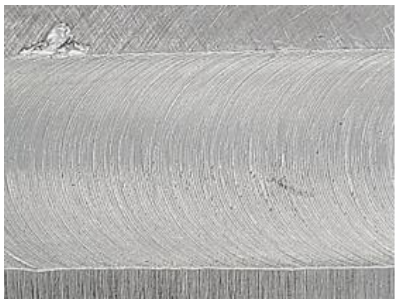


Рис. 3. Внешний вид области фрикционного упрочнения сплава 1565чН2 при обработке рабочим инструментом без стержня (пина)

Важно подчеркнуть, что при обработке поверхности алюминиевого сплава 1565чН2 со стержнем длиной от 0,5 до 2 мм и диаметром заплечика 28 мм внешний вид зоны фрикционного упрочнения остается практически без изменений.

В случае обработки поверхности сплава 1565ч инструментом без стержня в контакте инструмента с поверхностью заготовки наблюдается формирование поверхностной структуры, которая при травлении выглядит более светлой по сравнению с исходной структурой обрабатываемого сплава (рисунок 4).

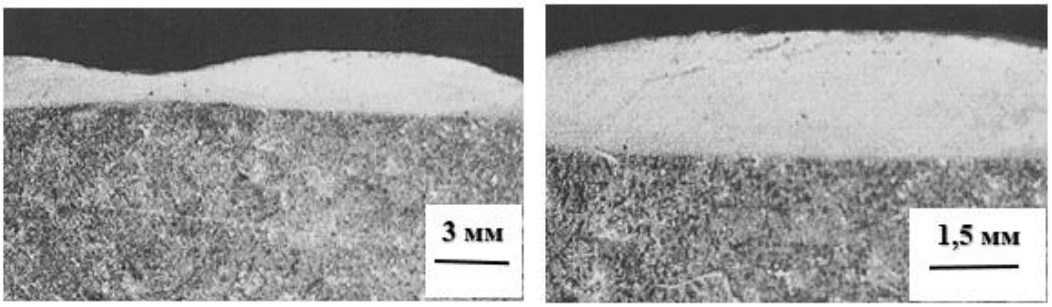


Рис. 4. Макроструктура области фрикционного упрочнения сплава 1565чН2 при обработке рабочим инструментом без стержня

Исследование микроструктурных особенностей зоны фрикционного упрочнения сплава 1565чН2 выявило их сходство с микроструктурой соединений, формируемых методом сварки трением с перемешиванием. В области, где материал подвергался деформации при высоких температурах, но не контактировал напрямую с инструментом, наблюдается вытягивание зерен по направлению движения металла (см. рисунок 5а).

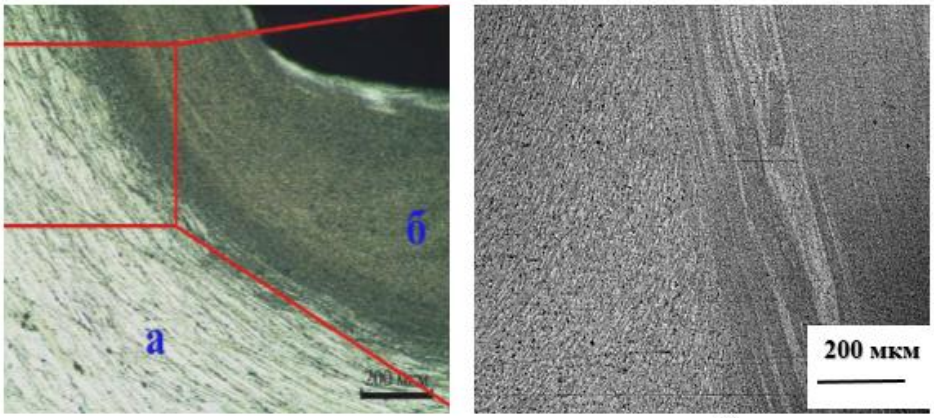


Рис. 5. Микроструктура области фрикционного упрочнения сплава 1565чН2: а – зона термомеханического воздействия; б – динамически рекристаллизованная зона

С учетом структурного сходства данную область целесообразно классифицировать как зону термомеханического воздействия, возникающую при сухом трении скольжения, проводя аналогию со сваркой трением с перемешиванием. Непосредственно контактирующий с инструментом участок материала по своей природе соответствует динамически рекристаллизованной зоне, что полностью согласуется с характеристиками зоны перемешивания, наблюдаемой при сварке трением (см. рисунок 5б).

В таблице 1 приведены данные по величине твердости HV области фрикционного упрочнения и среднему размеру зерна в указанной зоне при обработке инструментом без стержня (пина) и со стержнем различной длины.

Таблица 1

Твердость и средний размер зерна в области фрикционного упрочнения сплава 1565чН2

Показатель	Сплав 1565чН2	Область фрикционного упрочнения				
		Длина стержня, мм				
		0	0,5	1,0	1,5	2,0
Твердость HV	53	65	70	72	88	106
Средний размер зерна, мкм	32	8,3	6,7	5,5	2,7	2,3

Распределение микротвердости и микроструктуры в зоне обработки неравномерное и зависит от длины наконечника инструмента. Наиболее высокую твердость центральной части области фрикционного упрочнения обеспечивает пин (наконечник) длиной 2,0 мм.

Следует подчеркнуть, что фрикционное упрочнение эффективно снижает среднюю величину зерна в зоне перемешивания. Использование инструмента без пина уменьшает размер зерна по сравнению с исходным сплавом в 3,8–3,9 раза, достигая значения 8,3 мкм. Применение рабочего инструмента с пином высотой 0,5–1,0 мм позволяет добиться показателя 5,5–6,7 мкм. Наиболее выраженное измельчение зерна до 2,3–2,7 мкм обеспечивается при использовании инструмента с пином длиной 1,5–2,0 мм.

Часто одного прохода для упрочнения сложной поверхности детали из алюминиевого сплава бывает мало. Чтобы обработать такие поверхности, используют фрикционную обработку с частичным перекрытием соседних проходов. Для плоских образцов оптимальным считается перекрытие смежных проходов в диапазоне 0,25–0,33.

Результаты усталостных испытаний корсетных образцов из сплава 1565чН2 представлены в табл. 2. В указанной таблице приведена усталостная долговечность, характеризуемая количеством циклов нагружения до разрушения ($N_р$) и количеством циклов до возникновения трещины (N_0). Характеристику N_0 определяли по изменению частоты нагружения, что является достаточно условным показателем. В тоже время для корсетных образцов можно отметить, что различия в наработках $N_р$ и N_0 крайне незначительны.

Таблица 2

Усталостная долговечность образцов из сплава 1565чН2

Технологическая схема упрочнения	Условный номер образца	Уровень напряжений цикла σ_{max}, МПа	$N_р$	N_0
			цикл.	
1	*2*	*3*	*4*	
Исходная фрезерная обработка	1	165	135260	135260
	2	165	130430	130111
	3	165	145430	144910
	4	185	93480	92850

Окончание табл. 2

1	*2*	*3*	*4*	
Виброударная абразивная обработка керамическими чипсами	1	165	986020	986000
	2	165	834620	833100
	3	165	872350	871790
	4	185	301250	301150
Фрикционная обработка поверхности	1	165	1092400	1092120
	2	165	938350	933430
	3	165	921350	919870
	4	185	388410	387930

Незначительный объем испытанных образцов не дает оснований для статистической оценки и формирования выводов, но некоторые тенденции влияния технологии поверхностного упрочнения на усталостное разрушение можно выявить при анализе полученных результатов.

Следует отметить незначительный разброс значений усталостной долговечности, полученный при испытании исходных образцов после фрезерования, что указывает на стабильность характеристик материала, идентичность технологии механической обработки лезвийным инструментом и условий испытаний.

Виброударная абразивная обработка керамическими чипсами, обеспечивая высокие показатели усталостной долговечности, приводит к значительному разбросу данной характеристики. Причиной значительного разброса значений усталостной долговечности при виброударной абразивной обработке керамическими чипсами, являются, по-видимому, незначительные острые надрезы, являющиеся концентраторами напряжения и очагами образования усталостных трещин при переменном нагружении.

По сравнению с виброударной абразивной обработкой керамическим чипсами фрикционная поверхностная обработка дает более стабильные показатели усталостной долговечности сплава 1565чН2.

Для испытаний образцов с фрикционным упрочнением поверхности отмечен факт изменения характера разрушения. Разрушению всех образцов предшествовала стадия образования усталостной трещины от нормальных напряжений и последующий ее рост с образованием усталостной зоны, перпендикулярной растягивающим напряжениям. Затем происходил поворот плоскости разрушения, и окончательное разрушение можно квалифицировать как разрушение от касательных напряжений. В тоже время на ряде образцов, подвергнутых фрикционной обработке, отсутствовала макроплощадка, перпендикулярная к растягивающим напряжениям. Разрушение происходило как бы от касательных напряжений. Следует отметить, что усталостная долговечность такого образца значительно превосходит долговечность других образцов, прошедших фрикционную обработку.

Установленный факт изменения характера разрушения показывает возможность воздействия на характер разрушения путем формирования определенного напряженного состояния и, как следствие, воздействия на характеристику усталостной долговечности.

Результаты исследований продемонстрировали возможность повышения усталостной долговечности алюминиевого сплава 1565чН2 различными технологическими приемами упрочнения поверхности и необходимость разработки для каждого конкретного сплава наиболее оптимальной технологической схемы поверхностной обработки.

Список литературы

1. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследование прочности авиационных материалов. // Авиационные материалы и технологии. 2012. №6. С.440–448.

2. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности. // Вопросы материаловедения. 2013 №1 (73). С.212–219.

Панов А.Н.
к.т.н., главный эксперт
ЮРС-РУСЬ
Россия, Санкт-Петербург
a.panov@tut.by
Ромашова Е.Ю.
младший научный сотрудник
ИМАШ РАН
Россия, Москва
romashova@imash.ru
Гиршфельд П.А.
аспирант
ИМАШ РАН
Россия, Москва
girshfeld@hotmail.com

К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ МОДЕЛЕЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ РИСКОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТНО-ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА. ИННОВАЦИОННАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МАШИНОВЕДЕНИИ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы излишней материалоемкости и не конкурентоспособности по критерию «качество-цена-риски» из-за применения не адекватной модели стандартизации в металлургии, основанной на детерминированном, допусковом, отчасти статистической и декларативной парадигме. Предлагается модель стандартизации в металлургии на основе рискориентированного проектно-процессного под-

хода, а также соответствующая инновационная методология проектирования в машиностроении и машиноведении. Методология основана на управлении характеристиками продукции и процесса тиражирования в зависимости от значимости последствий для конфигуратора. Разработанные модели нашли практическое применение в массовом и серийном машиностроении и смежных областях.

Ключевые слова: качество, проектирование, стандартизация, риски, металлургия, характеристики, машиностроение, машиноведение.

Panov A.N.
Candidate of Technical Sciences, Chief Expert
URS-RUSS
Russia, Saint-Petersburg
a.panov@tut.by
Romashova E.Yu.
Junior Researcher
IMASH RAS
Russia, Moscow
romashova@imash.ru
Girshfeld P.A.
Postgraduate Student
Russia, Moscow
girshfeld@hotmail.com

ON THE ISSUE OF CREATING STANDARDIZATION MODELS IN METALLURGY BASED ON A RISK-ORIENTED PROJECT-PROCESS APPROACH. INNOVATIVE DESIGN METHODOLOGY IN MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICAL SCIENCE

Abstract. The article discusses the problems of excessive material consumption and lack of competitiveness according to the criterion of «quality-price-risks» due to the use of an inadequate standardization model in metallurgy based on a deterministic, tolerance, partly statistical and declarative paradigm. A standardization model in metallurgy based on a risk-based design and process approach is proposed, as well as an appropriate innovative design methodology in mechanical engineering and machine science. The methodology is based on the management of product characteristics and the replication process, depending on the significance of the consequences for the configurator. The developed models have found practical application in mass and serial engineering and related fields.

Keywords: quality, design, standardization, risks, metallurgy, characteristics, mechanical engineering, machine science

Материалоемкость и надежность техники традиционно считаются противоречивыми требованиями при создании техники и технологии [1–24]. Известно, что ресурсом уменьшения материалоемкости является снижение вариации характеристик материалов и дефектности, как в материале, так и в профилях [1–24].

Традиционная модель разработки стандартов на материалы и профили из них («Общие технические условия», например, ГОСТ 19281), как правило,

включает разделы: область применения, нормативные ссылки, термины и определения, классификация и сортамент, технические требования, правила приемки, методы контроля, транспортирование и хранение, требования безопасности и охраны окружающей среды, гарантии изготовителя, а также приложения; построенная на основе проектирования детерминированной (задание номинальных значений), допусковой (установление двухсторонних и односторонних допусков), отчасти статистической (накопление статистических данных). При этом парадигма достижения качества – контроль с целью попадания значений характеристик в заданные поля допусков [1–27].

Классические методы проектирования включают как проектные, так и поверочные расчеты, в том числе с помощью численных методов, такие как метод конечных элементов. Для оценки напряженно-деформированного состояния, прогнозирования ресурса используются характеристики сопротивления усталости (например, ГОСТ 23207) и нагруженности (например, ГОСТ 23605), полученные как из стандартов на материалы, так и расчетно-экспериментальными методами, испытаниями (например, ГОСТ 25.507) на элементах либо на натурной конструкции, в том числе в соответствии с техническими требованиями. Соответственно, характеристики материалов и допустимая стандартами на материалы и допустимую дефектность на профили используются в расчетах, учитываются при получении статистических характеристик, используемых при прогнозировании и экспериментальных оценках надежности при подтверждении соответствия техническим требованиям [1–27].

В проектных и поверочных расчетах в машиноведении и машиностроении вводятся значительные величины коэффициентов запаса для уменьшения рисков вариации характеристик материалов и профилей, что существенно влияет на стоимость, но не гарантирует достижения показателей надежности (ресурс и т.п.). Например, в нормах-методиках (ГОСТ, справочники и т.п.), в расчетах на циклическую долговечность учитывается вариация как свойств материала, так и геометрических характеристик профилей. Рекомендуемая [1–23] величина коэффициента вариации, как правило, составляет порядка 10% от среднего значения (математического ожидания) показателя рассматриваемой характеристики (предел выносливости и т.п.). Таким образом, указанное значимо влияет на выбор коэффициента запаса для предотвращения значительного сокращения ресурса техники и, соответственно, надежности.

Для разработки модели стандартизации в металлургии и развития методологии рискориентированного проектирования продукции и процессов в части управления вероятностью соответствия характеристик в зависимости от значимости последствий и интегрального ущерба от первопричины до конфигуратора (в котором функционирует созданная с применением материалов и профилей социотехническая система) использованы, либо развитые следующие термины с соответствующими определениями:

стандарт (standard): оптимальным образом упорядоченная, повторяющаяся деятельность при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами.

Примечание – в действующем законодательстве может использоваться иное определение термина. Данное определение применяется в рамках рискориентированного мышления.

статистическое управление процессом (statistical process control (SPC)): деятельность, ориентированная на использование статистических методов для уменьшения вариации процесса, повышение знаний о процессе и направление процесса в желаемое состояние.

угроза (threat): потенциальный источник опасности, вреда или другого нежелательного результата (СТБ ISO 31073).

ущерб (damage): потенциальная или фактическая потеря.

Примечания:

1. Ущерб по значимости может быть пренебрежимым, приемлемым и чрезмерным.

2. Ущерб по воздействию может быть прямым, косвенным и отдаленным.

3. Ущерб в конечном итоге при анализе рисков имеет финансовый эквивалент.

уязвимость (vulnerability): непригодность системы противостоять угрозам при достижении цели.

фрактал (fractal) <система менеджмента>: упорядоченная, устойчивая информационная структура/код, задающая возможности и ограничения для взаимодействия/развития открытых самоорганизующихся сложных социотехнических систем путем синтеза подобных себе структур на различных уровнях их иерархии, позволяющая оптимально обеспечивать требуемую результативность/эффективность и защищенность.

цель (objective): результат, который будет достигаться (ISO 9000).

эффективность (efficiency): связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами (ISO 9000).

Предложенная рискориентированная проектно-процессная модель стандартизации для металлургии, позволяющая управлять характеристиками с учетом значимости последствий (в том числе вариацией характеристик материалов и профилей) в зависимости от значимости последствий на основании оценки интегрального ущерба, основана на модернизированных моделях:

- идентификация цепей причинно-следственных связей источников отказов («источник – материал / профиль») и их результатов – «последствие для конфигуратора» (не выполнение технологической операции, в которой функционирует созданная социотехническая система) (рис. 1);

- оптимизации обеспечения надежности для невосстанавливаемой технической системы с учетом значимости приоритета на основе управления характеристиками материалов и профилей (рис. 2);

- интенсивности мгновенных отказов технической системы для потребителя с учетом рисков источников отказов – характеристик материалов и профилей (рис. 3);

- требований идентификации в конструкторско-технологической документации – характеристика материалов и профилей с указанием значимости последствий для конфигуратора при управлении рисками источников отказов (рис. 4.).

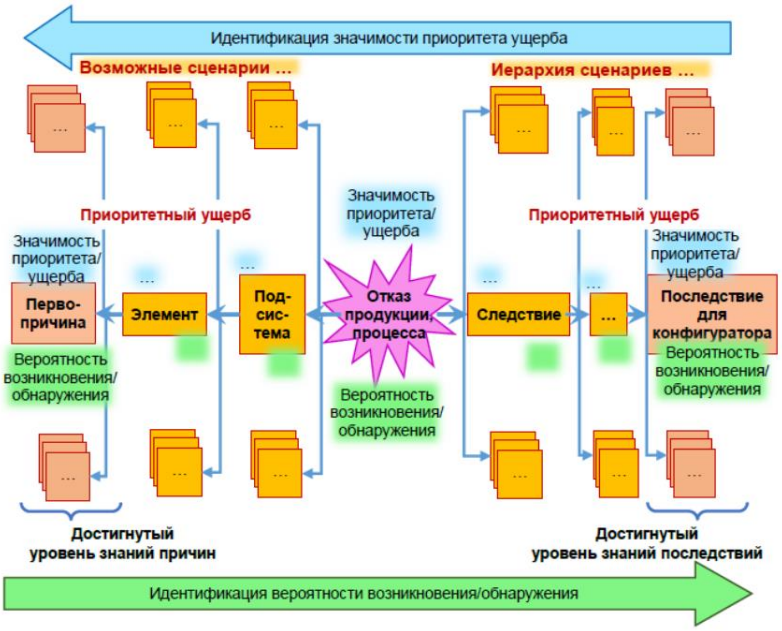


Рис. 1. Идентификация цепей причинно-следственных связей источников отказов «источник- материал / профиль» и их результатов– «последствие для конфигуратора»

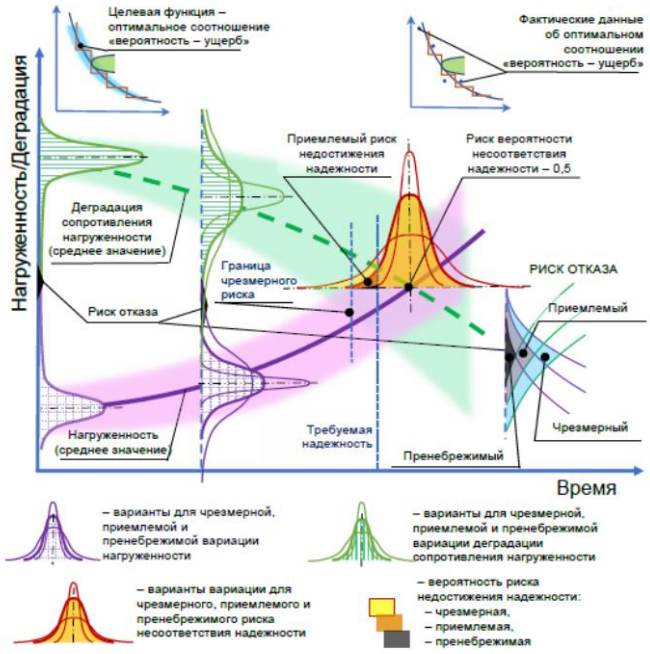


Рис. 2. Модель оптимизации обеспечения надежности для евосстанавливаемой технической системы с учетом значимости приоритета на основе управления характеристиками материалов и профилей

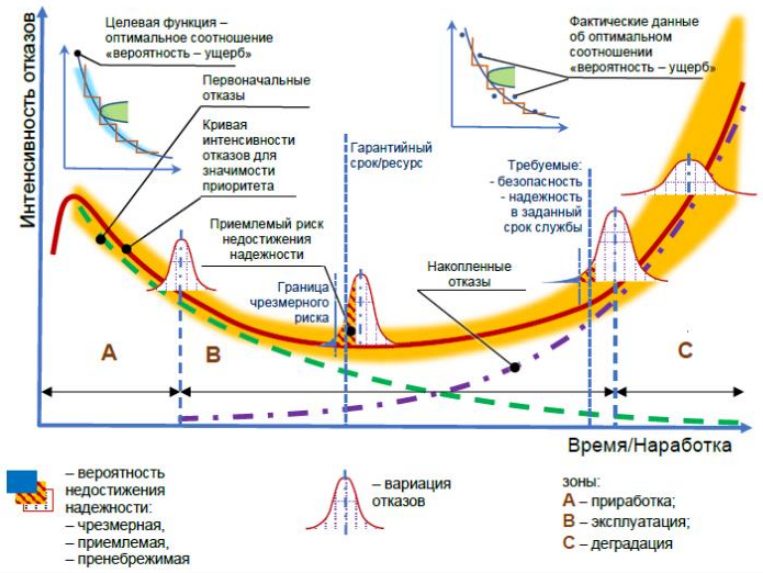


Рис. 3. Модель интенсивности мгновенных отказов технической системы для потребителя с учетом рисков источников отказов – характеристик материалов и профилей

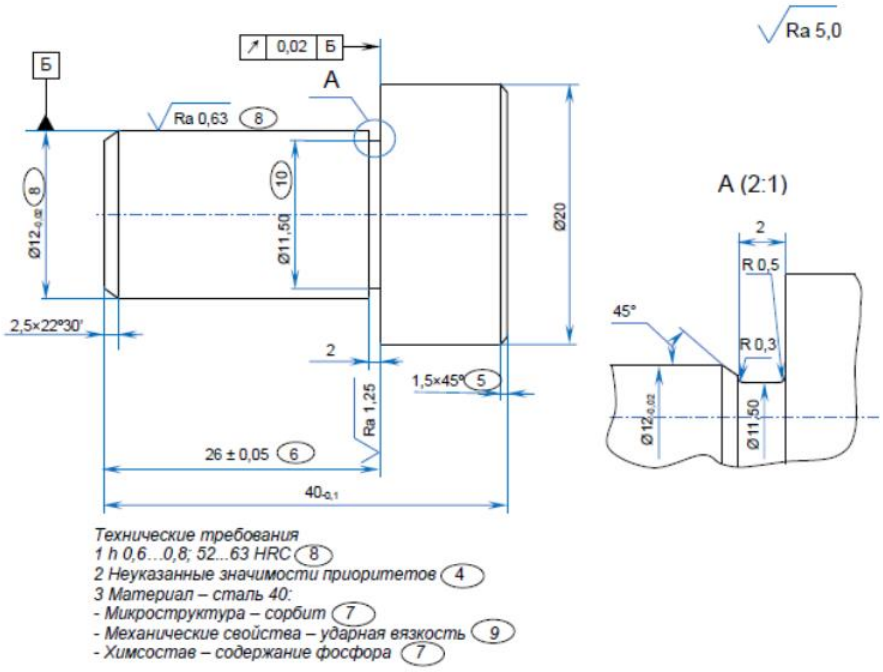


Рис. 4. Пример установления требований для управления рисками источников отказов – характеристиками материалов с указанием значимости последствий для конфигуратора

Для реализации моделей предложено ввести новые виды конструкторско-технологических документов, в том числе в металлургии, таких как «План управления рисками», «Анализ рисков», «Деревья причинно- следственных связей до источника отказа» – характеристик материала и профиля. Указанное позволяет снизить вероятность отказа, например, по причине вариации характеристик на порядки, например с 3000 ppm до 6 ppm и менее [1–27].

Структуру моделей взаимосвязанных рисков предлагается реализовывать разложением начиная от наличия знаний (на основании актуальных знаний науки и техники) источников отказов и данных о критериальных характеристиках «рисков последствий – событий» наступления отказа ММ до «источника рисков»

$$[\{ R_{Fi\ O\ SEI\ KD}\}]_{nn} \rightarrow [\{R_o\}]_{nn} \rightarrow [\{R_m\}]_{nn} \rightarrow [\{R_i\}]_{nn} \rightarrow [\{R_{jk}\}]_{nn} \rightarrow$$
$$\rightarrow [\{R_{ijk}[R_p ; R_{pp}]\}]_{nn} \quad (1)$$

где $[\{R_{Fi\ O\ SEI\ KD}\}]_{nn}$ – приемлемый риск наличия требуемых знаний и данных о критериальных характеристиках (вещество, энергия, информация) в конфигураторе и взаимосвязанных процессах функционирования технического объекта в ее ЖЦ и социотехнической системе;

$[\{R_{ijk}\}]_{nn}$ – массив критериальных приемлемых рисков;

$[R_p ; R_{pp}]$ – соответственно массивы рисков из-за конструктивного и технологического решений;

$[\{R_{jk}\}]_{nn}$ – приемлемый риск элемента (например, зоны потенциальных разрушений);

$[\{R_i\}]_{nn}$ – приемлемый риск подсистемы (например, узел конструкции);

$[\{R_m\}]_{nn}$ – приемлемый риск системы (например, конструкция в сборе, объект в целом);

$[\{R_o\}]_{nn}$ – приемлемый риск объекта-конфигуратора, в составе которой функционирует объект.

В заключении следует отметить следующее.

1. Причиной техногенных, природных и социальных рисков, а также неоптимальной материалоемкости и низкой конкурентоспособности машиностроительной продукции является, как наличие несоответствий (несплошности, включения, концентраторы напряжений и т.д.) в материалах и профилях, так и значительная вариация характеристик как свойств (химический состав, механические характеристики, хладноломкость и т.д.) материалов, так и геометрических характеристик профилей (вариация геометрии – концентраторов напряжений). Указанное значимо влияет на вариацию характеристик конечной продукции – машин, трубопроводов, турбин и пр.

2. Для парирования проблемы рисков вариации при проектировании в расчетах вводятся значительные величины коэффициентов запаса, что существенно влияет на стоимости, но не исключает не достижения показателей надежности (ресурс и т.п.). В действующих нормах, методиках (ГОСТ, справочники и т.п.), например, в расчетах на циклическую долговечность учитывается вариация как механических характеристик материала, так и геометрических значений профилей. Величина коэффициента вариации, как правило, составляет порядка 10% от среднего значения (математического ожидания) показателя рассматриваемой характеристики (предел выносли-

вости и т.п.). Таким образом, если предполагать, что распределение характеристик подчиняется нормальному распределению Гаусса, то среднеквадратическое значение характеристики и соответственно вероятность 99,7% будет достигать значительного сокращения ресурса.

3. Использование модели стандартизации в металлургии на основе детерминированного, декларативного («гарантируется технологией» и т.п.) допускового и в отдельных случаях статистического подходов не позволяет методологически проектировщикам продукции и процессов в машиностроении и машиноведении снижать материалоемкость и обеспечивать конкурентоспособность по критерию «качество – цена – риски».

4. Предложена рискориентированная проектно-процессная модель стандартизации для металлургии, позволяющая управлять характеристиками материалов и профилей (в том числе вариацией) в зависимости от значимости последствий на основании оценки интегрального ущерба. Указанное позволяет снизить вероятность отказа по причине вариации характеристик на порядки, например с 3000 ppm, до 6 ppm.

5. Предложена инновационная методология проектирования в машиностроении и машиноведении, которая основана на задании при проектировании требований к материалам и профилям в зависимости от значимости рисков, что позволяет управлять вероятностью отказа техники и технологий, системно снизить материалоемкость повысить конкурентоспособность. Для этого необходимо вводить новые виды конструкторско-технологических документов, таких как «План управления рисками», «Анализ рисков», построения «деревьев причинно- следственных связей от источника отказа до последствий» – характеристик материала и профиля.

6. Результаты работы использованы при разработке (с участием авторов публикации) государственных стандартов для системы менеджмента качества, менеджмента рисков при создании автотракторостроения, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного, электротранспортного и специального машиностроения.

Научный доклад выполнен в рамках научной темы FFGU-2024-0024.

Список литературы

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности/ Под общ. ред. Махутова Н.А.- М.: МГФО «Знание», 2015, – 936 с., ил.

2. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных человеко-машинных систем. Под общ. редакцией В.А. Боришпольца. Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, – М.: МГОФ «Знание», 2021. – 432 с.

3. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного

транспорта». Техногенная безопасность подвижного состава железнодорожного транспорта. Раздел II Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, – М.: МГОФ «Знание», 2020, – 488 с.

4. Махутов, Н.А. Совершенствование научной базы и нормативного обоснования безопасности колесных мобильных машин/Н.А. Махутов, А.Н. Панов О.Н. //Проблемы безопас-ности и чрезвычайных ситуаций. – 2021, №1. С. 34–43.

5. Лепихин А.М., Морозов Е.М., Махутов Н.А., Лещенко В.В. Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимых размеров дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022;88(3): С. 41–50,

6. Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Румянцева Е.А., Гадолина И.В. Метод оценки долговечности конструкций при стационарном и нестационарном случайных нагружениях с применением вариационной модовой декомпозиции. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024;90(9): С. 63–74

7. Горбацевич М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/М.И. Горбацевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общей ред. А.Н. Панова. – Мн.: «Технопринт», 2005г.–264 с.:ил.

8. Панов А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография/А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрецов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общей ред. А.Н. Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.: ил.

9. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Складнова М.С. К вопросу о рисках применения цифровых моделей в машиноведении. В сборнике: Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды VIII Международной научной конференции. Москва, 2024. С. 172–173.

10, Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Рискориентированный проектно-процессный подход – системная основа конкурентоспособности машиностроения. В сборнике: Человеческий капитал в новой реальности. материалы пленарной международной научно-практической конференции в рамках VI международного Московского академического экономического форума «Российская экономика 2024+: новые решения в новой реальности». Москва, 2024. С. 89–97.

11. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композитных материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 198.- 261 с., ил.

12. Гребенник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): Справочник. – М.: Металлургия, 1989 .592 с.

13. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Издательство стандартов, 1989 – 224 с.

14. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: Учебник для вузов / В.А. Зорин. М.: ООО «Магистр – Пресс», 2005. 536 с.

15. Зорин В.А. Надежность механических систем.: Учебник. – М.: ИНФРА- М, 205.- 380 с.

16. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изднлий. – М.: Олита, 2003.- 472 с.

17. Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов строительных, путевых и подъемно-транспортных маши: учебник. – М.: ООО «Издательский дом «Автограф», 2016.–368 с.

18. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты на прочность деталей машин. М., «Машиностроение», 1975, с. 488

19. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М., «Машиностроение»,1977

20. Махутов НА. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М., «Машиностроение», 1981, с. 272

21 ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.

22. ГОСТ 19281–2014 Прокат повышенной прочности. Общие технические условия.

23. ГОСТ 23605-79 Надежность в технике статистическая оценка нагруженности машин и механизмов. Методы типизации режимов нагружения.

24. ГОСТ 25.507-85 Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования.

25. Почтенный Е.К. Кинетика усталости машиностроительных конструкций. – Мн.: УП «Ари-Фекс», 2002.180 с. ил.

26. Берестнев О.В. Нормирование надежности технических систем: Монография/ О.В. Берестнев, Ю.Л. Солитерман, А.М. Гоман – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 266 с.

27. Ракицкий А.А., Бернацкий А.К. Обеспечение ресурса рессорных подвесок. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 166 с.

Саводякина А.М.
специалист по учебно-методической работе
Московский политехнический университет
Россия, Москва
dementeva9595@gmail.com
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ СПЛАВА 1565ЧМ И АРМИРУЮЩИХ ЧАСТИЦ AL_2O_3, ПОЛУЧЕННЫЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Аннотация. В статье рассматривается технология получения металл-матричного композиционного материала на основе алюминиевого сплава 1565чМ, упрочнённого частицами оксида алюминия (Al_2O_3), с применением метода фрикционной обработки – сварки трением с перемешиванием. Исследованы особенности формирования структуры композита при многократном воздействии инструмента, характер распределения армирующих частиц, эволюция зеренной структуры и механические свойства полученного материала. Показано, что для достижения равномерного распределения упрочняющих частиц и однородной мелкозернистой структуры требуется не менее трёх-четырёх проходов обработки. Внедрение наночастиц Al_2O_3 (около 1%) приводит к увеличению прочности на 12–17% по сравнению с исходным сплавом, однако сопровождается снижением пластичности. Основной вклад в упрочнение вносит измельчение микроструктуры и рост плотности дислокаций, а также формирование агломератов армирующих частиц, что влияет на характер разрушения материала.

Ключевые слова: металл-матричный композит, алюминиевый сплав 1565чМ, оксид алюминия, фрикционная обработка, сварка трением с перемешиванием, микроструктура, механические свойства, упрочнение, распределение частиц.

Savodyakina A.M.
Specialist in Educational and Methodological Work
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
dementeva9595@gmail.com
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

METAL MATRIX COMPOSITE BASED ON 1565chM ALLOY AND Al_2O_3 REINFORCING PARTICLES OBTAINED BY FRICTION MACHINING

Abstract. The article discusses the technology of obtaining a metal-matrix composite material based on an aluminum alloy of 1565chM, strengthened with particles of aluminum oxide (Al_2O_3), using the method of friction treatment – friction stir welding. The features of the formation of the composite structure under repeated impact of the tool, the nature of the distribution of reinforcing particles, the evolution of the grain structure and the mechanical properties of the resulting material are investigated. It has been shown that at least three to four processing passes are required to achieve a uniform distribution of hardening particles and a homogeneous fine-grained structure. The introduction of Al_2O_3 nanoparticles (about 1%) leads to an increase in strength by 12–17% compared to the original alloy, but is accompanied by a decrease in plasticity. The main contribution to hardening is made by the grinding of the microstructure and the increase in the density of dislocations, as well as the formation of agglomerates of reinforcing particles, which affects the nature of the destruction of the material.

Keywords: metal-matrix composite, aluminum alloy 1565chM, aluminum oxide, friction machining, friction stir welding, microstructure, mechanical properties, hardening, particle distribution.

Металл-матричные композиты (ММК) на основе алюминиевых сплавов, упрочнённые частицами оксида алюминия (Al_2O_3), находят широкое применение в высокотехнологичных отраслях промышленности благодаря сочетанию низкой плотности, высокой удельной прочности, износостойкости и стабильности механических свойств при повышенных температурах.

Применяются в производстве корпусных деталей автомобилей, элементов подвески, тормозных дисков и других компонентов, подверженных интенсивным механическим нагрузкам и износу.

Металл-матричные композиты (ММК) на основе алюминиевых сплавов получают с помощью ряда технологий, обеспечивающих равномерное распределение упрочняющих частиц (например, оксида алюминия, карбида кремния) в металлической матрице и формирование требуемых механических и эксплуатационных свойств. Основные методы получения МКК представлены в таблице 1.

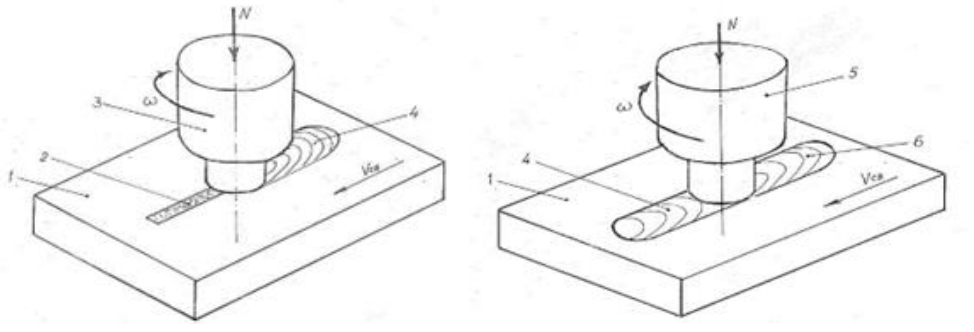
Таблица 1

Основные методы получения металл-матричных композиционных материалов

Технология	Краткое описание
Литьё с перемешиванием (stir casting)	В расплав алюминия вводят упрочняющие частицы и перемешивают для их равномерного распределения. Метод прост, экономичен, но требует контроля агломерации частиц.
Порошковая металлургия	Смешивание порошков алюминия и упрочняющих фаз, компактирование (прессование) и последующее спекание или горячее прессование. Позволяет получать композиты с высокой плотностью и равномерной структурой.
Методы инфильтрации	Расплав алюминия под давлением или вакуумом пропитывает пористый каркас из упрочняющих частиц. Обеспечивает высокую степень армирования и плотную структуру.
Методы напыления и осаждения	Нанесение матричного металла на упрочняющие частицы с последующим консолидированием (например, горячим прессованием). Используется для получения композитов с высокой адгезией между фазами.
Методы in-situ (реакционное формирование)	Упрочняющие фазы формируются непосредственно в матрице в результате химических реакций между компонентами расплава. Обеспечивает высокую прочность связи между матрицей и частицами, минимальное количество дефектов.

Фрикционная обработка – это эффективный метод поверхностного упрочнения, применяемый для формирования металл-матричных композитов (ММК) на основе алюминиевых сплавов непосредственно на поверхности готовых изделий. Суть технологии заключается в интенсивной пластической деформации и локальном нагреве поверхностного слоя с одновременным внедрением упрочняющих частиц (например, оксида алюминия, карбида кремния, частиц керамики). Упомянутый метод фрикционной обработки не требует применения сложного оборудования, применим для обработки готовых деталей сложной формы и обладает высокой экологичностью.

Материал ММК-композит синтезировали на основе холоднокатаных листов алюминиевого сплава 1565чМ, в которых предварительно были сформированы канавки, заполненные нанопорошком оксида алюминия. Процесс осуществлялся методом сварки трением с перемешиванием при выполнении 1, 2 и 3 прохода (рис. 1). После завершения каждого прохода заготовку переворачивали, что обеспечивало проведение следующего прохода с обратной стороны, при этом входные и выходные точки инструмента оставались идентичными.



а *б*

Рис. 1. Схема получения МКМ-композита с помощью сварки трением с перемешиванием: а – закрытие паза со свинцовым порошком; б – проход инструментом со стержнем для получения композиционного материала; 1 – пластина из алюминиевого сплава 1565чМ; 2 – паз с порошком Al_2O_3; 3 – рабочий инструмент без стержня; 4 – закрывающий паз шов; 5 – инструмент со стержнем; 6 – шов, состоящий из композиционного материала системы 1565чМ– Al_2O_3; N – осевое усилие на рабочий инструмент; ω – частота вращения рабочего инструмента

Направление прокатки листов сплава 1565чМ и направление сварки были совмещены. Параметры режима включали скорость вращения и подачи инструмента СТП на уровне 800 об/мин и 135 мм/мин соответственно. В ходе сварочного процесса осуществлялся замер температур вблизи границы зоны интенсивного перемешивания, что позволило сформировать температурный профиль, представленный на рисунке 2.

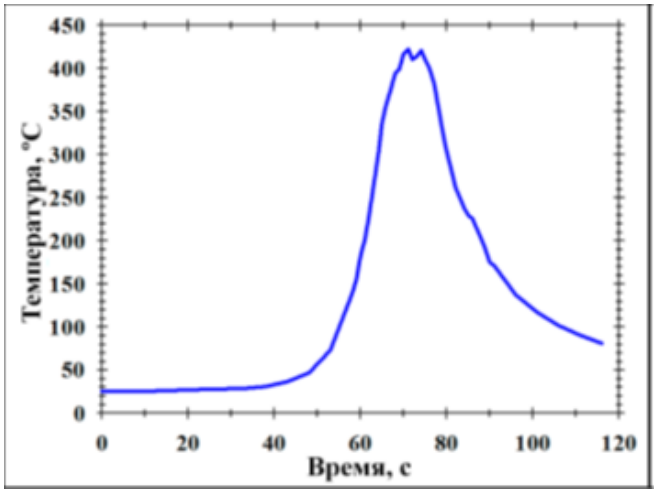


Рис. 2. Термический цикл при СТП, измеренный на краю зоны перемешивания

Полученный термический цикл показал, что в процессе формирования композиционного материала температура на краю зоны перемешивания в процессе фрикционной сварки составила 415–423 °С.

На рисунке 3 представлена зависимость макроструктуры зоны перемешивания от числа проходов при сварке трением с перемешиванием. Следует учитывать, что исследуемая поверхность шлифа прошла виброполировку без последующего травления, в связи с чем вариации оптического контраста на рисунке 3 обусловлены неравномерным распределением армирующих частиц.

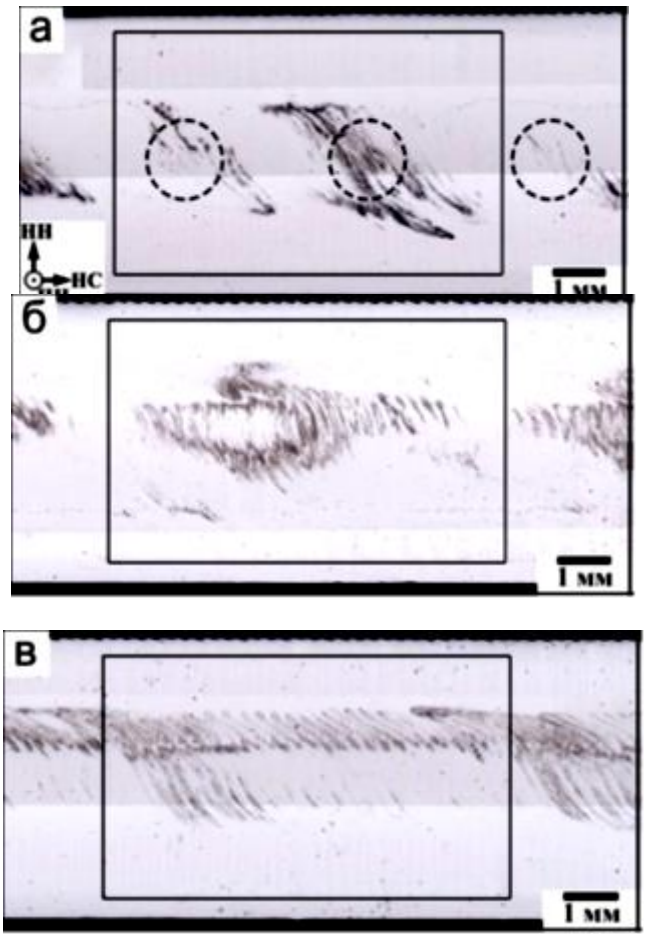


Рис. 3. Оптические изображения продольных сечений СТП-композита в зависимости от количества проходов:

1 проход (а), 2 прохода (б), 3 прохода (в)

По итогам первой обработки порошок Al_2O_3 преимущественно сохранялся в зонах первоначального нанесения, то есть в пазе (рис. 3, *а*). Наглядно демонстрируется, что однократного воздействия недостаточно для формирования качественного композитного материала с равномерным распределением армирующих частиц. Наблюдается интересное распределение частиц по вертикали. Это говорит о том, что материал активно перемещается вверх и вниз в зоне перемешивания.

После двух циклов обработки СТП макроструктура приобрела более равномерный характер (рис. 3, *б*), при этом армирующие элементы всё ещё в значительной степени сохраняют положение, близкое к первоначальному.

После выполнения третьего ц1икла СТП образовалась характерная микроструктура, представляющая собой чередующиеся вертикальные полосы с включенными частицами, распределенные по всему объему зоны деформации (см. рис. 3, *в*). Примечательно, что средний шаг между этими полосами равен примерно 240–250 мкм, что практически совпадает с величиной смещения инструмента за один полный оборот.

Кроме того, доля армирующих частиц в верхней и нижней частях зоны перемешивания продолжает увеличиваться, что свидетельствует о значительном вертикальном массопереносе при СТП.

На рисунке 4 представлены EBSD-карта зоны перемешивания сплава 1565чМ без введения армирующих частиц и ПЭМ-изображение указанной зоны.

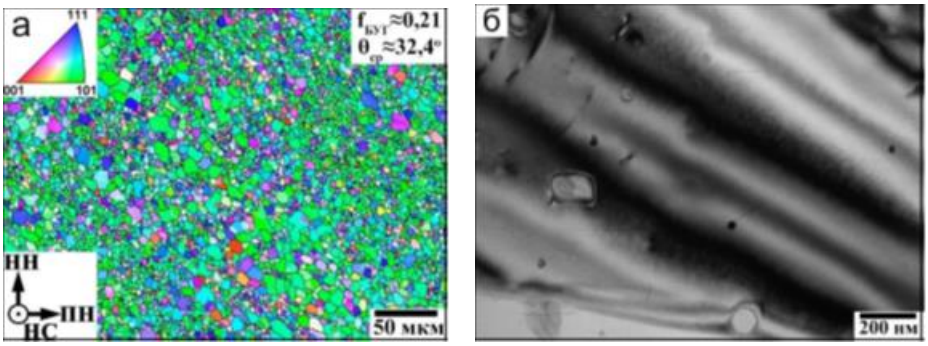


Рис. 4. Микроструктура зоны перемешивания сплава 1565чМ: EBSD-карта (а), ПЭМ-изображение (б)

Как и ожидалось, в микроструктуре преобладают сравнительно мелкие практически равноосные зерна со средним размером около 3,5–4,2 мкм, содержащие значительную долю МУГ ≈21%. Подобная структура обычно наблюдается в алюминиевых сплавах, подвергнутых сварке/обработке трением с перемешиванием, и, как правило, объясняются развитием непрерывной динамической рекристаллизации. Примечательно, что измеренная доля БУГ была несколько выше, чем наблюдаемая обычно при непрерывной динамической рекристаллизации в 60–70%.

Рисунок 5 демонстрирует набор EBSD-карт для композита, подвергнутого обработке СТП после 1, 2 и 3 проходов. На данных изображениях зерна раскрашены согласно их кристаллографической ориентации по отношению к поперечному направлению (цветовая кодировка в виде треугольника приведена на рис. 4). Черные пиксели обозначают зоны с индексом достоверности менее 0,1, которые, вероятнее всего, соответствуют агромерациям Al_2O_3.

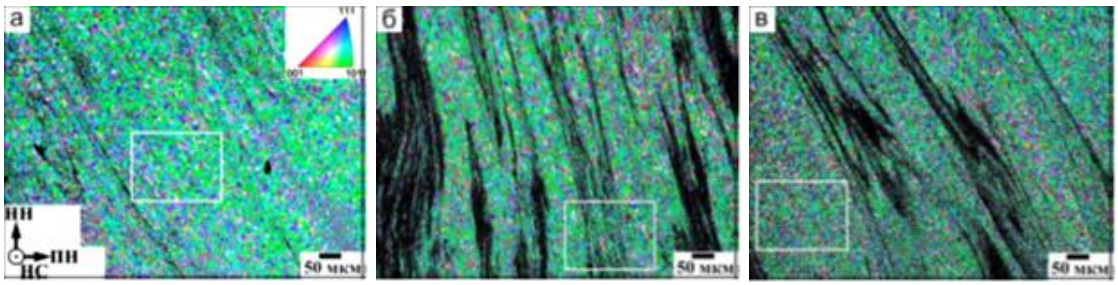


Рис. 5. EBSD-карты центральной части зоны перемешивания СТП-композита с малым увеличением: 1 проход (а), 2 прохода (б), 3 прохода (в)

Из-за сложности получения надежных данных с помощью EBSD-анализа в областях, обогащенных армирующими частицами оксида алюминия микроструктурные исследования СТП-композита были сосредоточены на алюминиевой матрице (белые прямоугольники на рисунке 5).

Рисунок 6 демонстрирует EBSD-карты высокого разрешения, полученные для указанных областей. На рисунке 7 показаны соответствующие микроструктурные параметры, выделенные на основе данных EBSD-картирования.

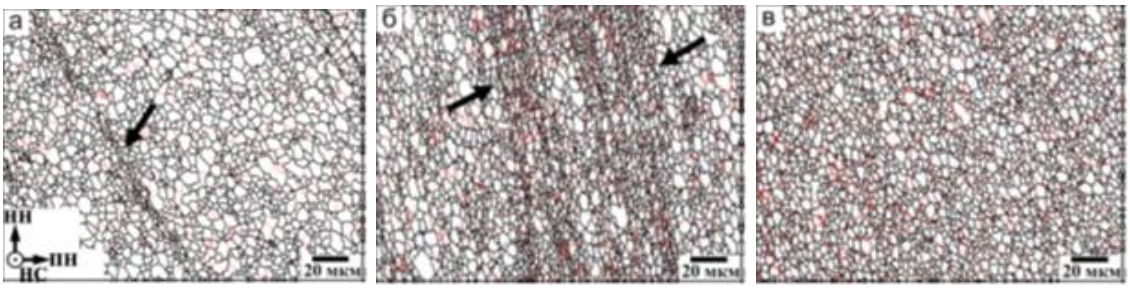


Рис. 6. EBSD-карты частей зоны перемешивания, обозначенных на рисунке 5, СТП-композита с большим увеличением: 1 проход (а), 2 прохода (б), 3 прохода (в)

По завершении первого и второго проходов обработки СТП ключевой микроструктурной характеристикой становятся сформированные узкие зоны мелкого зерна, обозначенные стрелками на рисунках 6.а и 6.б. Стоит отметить, что данные полосы вместе с прилегающими участками характеризуются повышенным содержанием высокоугловых границ зерен (рисунок 6.б). Вероятной причиной данного явления выступает воздействие наноразмерных дисперсоидов оксида алюминия (Al_2O_3).

Согласно имеющимся данным, небольшие скопления наноразмерных частиц способны инициировать процессы рекристаллизации [1], что ведет к локальному уменьшению размера зерна. Параллельно с этим, дисперсные включения наномасштаба тормозят перемещение межзеренных границ и движение дислокаций. Первая тенденция усиливает эффект измельчения структуры, тогда как вторая препятствует переходу крупнозернистой фазы в мелкозернистую. По этой причине появление участков с мелким зерном, вероятно, связано с локальными скоплениями упрочняющих частиц оксида алюминия.

Следовательно, равномерное внедрение частиц Al_2O_3 в алюминиевую матрицу при возрастании количества циклов СТП вызвало не только измельчение зерен по всему объему материала, но и увеличение доли высокоугловых границ.

Как показывают представленные данные, исключительно по завершении трех-четырех циклов сварки трением с перемешиванием в СТП-композите устанавливается наиболее равномерная структура. Микроструктура такого композита и была подвергнута более детальному изучению.

На рисунке 7 демонстрируется характерная микроструктура композита СТП. Согласно данным, средний размер зерна оценивается примерно в 2,5 мкм, а доля мелкозернистых участков достигает 22% (см. рисунок 7, *а*). Анализ с помощью просвечивающей электронной микроскопии выявил незначительный рост плотности дислокаций по сравнению с исходным СТП-сплавом (до уровня около $1{,}8\times10^{13}$ м$^{-2}$), а также заметное увеличение объемной доли вторых фаз (рисунок 7, *б*). Примечательно, что армирующие включения Al_2O_3 склонны к образованию агломератов, чья морфология и габариты практически идентичны дисперсоидам Al_6Mn (рисунок 7, *б*). Совокупная объемная доля всех зафиксированных частиц составляет около 1,9%, при этом их средний размер для обоих типов частиц равен примерно 80–85 нм.

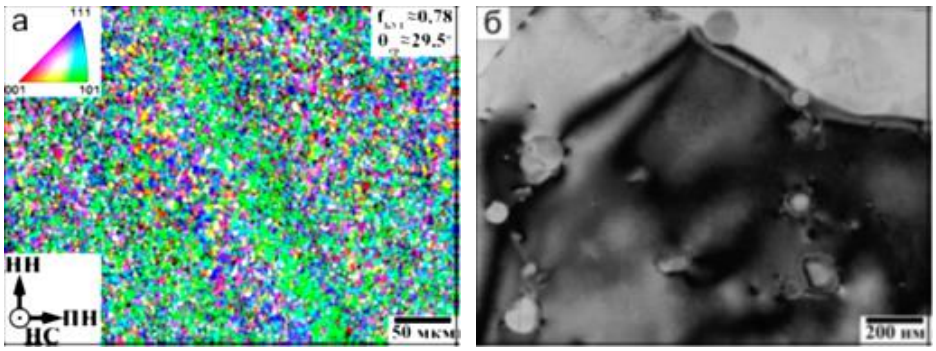


Рис. 7. Микроструктура зоны перемешивания СТП-композита: EBSD-карта (а), ПЭМ-изображение (б)

Механические свойства МКМ-композита, полученного фрикционной обработкой, в сравнении с механическими свойствами матричного сплава представлены в таблице 2.

Таблица 2

Механические свойства МКМ-композита и матричного сплава 1565чМ

Образец	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ,%
1565чМ	200	345	19,5
Сварное соединение СТП сплава 1565чМ	178	318	15,7
СТП-композит	214	360	10,2

Рисунок 8 демонстрирует вид поверхностей изломов, полученных в результате испытания на растяжение образцов из сплава 1565чМ СТП и композита СТП.

В СТП-сплаве поверхность излома имела типичный ямочный вид (рис. 8, а). Ямки имели форму, близкую к конической, и широкий диапазон размеров. Частиц Al_6Mn на поверхности излома не обнаружено.

Как показано на рисунке 8*б*, в СТП-композите ямки разрушения отличались меньшей глубиной и размерами. На поверхности излома наблюдались фрагменты с признаками хрупкого характера разрушения. Также были выявлены значительные скопления частиц Al_2O_3, что свидетельствует о склонности армирующих включений к легкому образованию трещин [2]. Именно этот фактор, вероятно, обуславливает снижение пластических свойств материала (табл. 2).

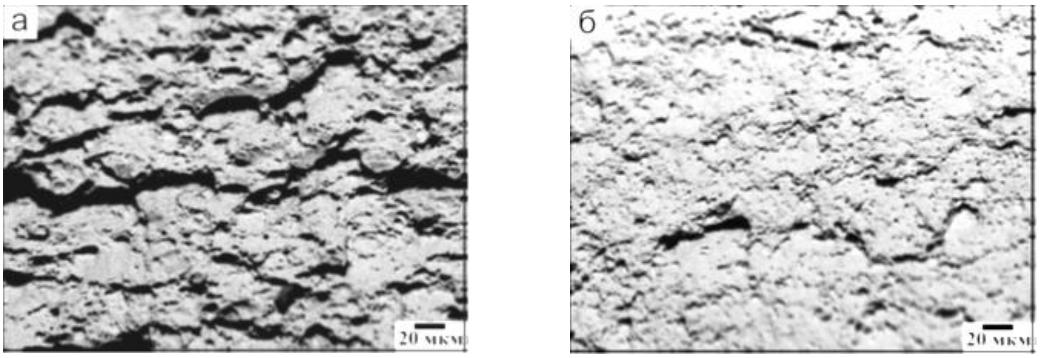


Рис. 8. Микрофотографии СЭМ поверхности изломов разрушенных при растяжении образцов СТП-сплава (а) и СТП-композита (б)

Добавление около 1% наночастиц оксида алюминия приводит к увеличению прочности материала на 12–17%, при этом сохраняются высокие показатели пластичности, достигающие 11%. Основной причиной упрочнения выступает не само внедрение частиц, а сопутствующее измельчение микроструктуры и рост плотности дислокаций.

Сложной задачей является создание равномерного распределения частиц. На макроуровне для достижения структурной однородности требуется выполнение значительного количества циклов (минимум 3–4). На микроуровне наблюдается склонность частиц к слипанию в агломераты, что невозможно устранить полностью.

Список литературы

1. Heidarzadeh A. и др. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution // Progress in Materials Science. 2021. Т. 117. С. 100752.

2. ASM handbook. 9: Metallography and microstructures. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004. 1184 с.

Резцов Р.Б.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
anikron_91@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТА ТИПА ЛИНИИ СТЫКА В СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ОДНОСТОРОННЕЙ СТП

Аннотация. В статье исследуется механизм образования дефекта типа «линия стыка» («Lazy S») в стыковых соединениях алюминиевых сплавов, выполненных односторонней сваркой трением с перемешиванием. Показано, что дефект возникает из-за неполного разрушения оксидной плёнки на торцах заготовок при неправильном выборе режимов сварки. Проведены металлографические и томографические исследования, подтвердившие, что линия стыка состоит из частиц Al_2O_3. Установлено, что увеличение протяжённости этого дефекта приводит к снижению временного сопротивления, угла изгиба, ударной вязкости и ограниченного предела выносливости сварных соединений. Анализ характера разрушения показал, что трещина распространяется от корня шва вдоль оксидной границы. Полученные результаты позволяют рекомендовать оптимальные параметры сварки для минимизации образования линии стыка и повышения надёжности конструкций из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, дефект «линия стыка», оксидная плёнка, механические свойства, предел выносливости, механизм разрушения, односторонняя сварка, качество сварного шва.

Reztsov R.B.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
anna1-2016@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

MECHANISM OF DEFECT FORMATION OF THE TYPE OF JOINT LINE IN BUTT JOINTS OF ALUMINUM ALLOYS MADE WITH ONE-SIDED STP

Abstract. The article investigates the mechanism of formation of a defect of the «joint line» («Lazy S») type in the butt joints of aluminum alloys performed by one-sided friction stir welding. It is shown that the defect occurs due to incomplete destruction of the oxide film at the ends of the workpieces with the wrong choice of welding modes. Metallographic and

tomographic studies were carried out, which confirmed that the joint line consists of Al_2O_3 particles. It has been established that an increase in the length of this defect leads to a decrease in the time resistance, bending angle, toughness and limited limit of endurance of welded joints. Analysis of the nature of the fracture showed that the crack extends from the root of the seam along the oxide boundary. The results obtained allow us to recommend optimal welding parameters to minimize the formation of a joint line and increase the reliability of structures made of aluminum alloys.

Keywords: Friction stir welding, aluminum alloys, «joint line» defect, oxide film, mechanical properties, endurance limit, fracture mechanism, single-sided welding, weld quality.

Одним из наиболее типичных дефектов при СТП алюминиевых сплавов является так называемая «линия стыка» (в международной практике известная как «Lazy S», см. рис. 1). Данный дефект признан самым опасным, поскольку его значительная протяженность вдоль сварного шва приводит к снижению несущей способности конструкции и вызывает ее стремительное разрушение.

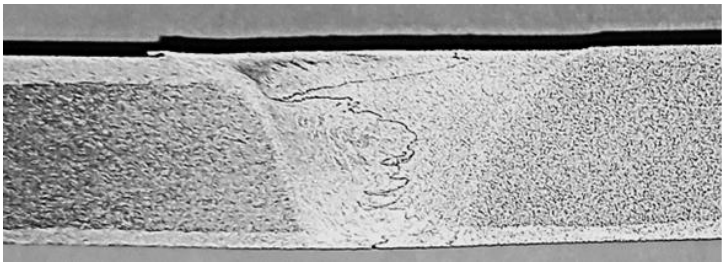


Рис. 1. Линия стыка на поперечном сечении сварного шва сплава 6082T6

Выполнение сварки трением с перемешиванием при высоких частотах вращения инструмента и уменьшенной силе прижима рабочего инструмента к поверхности свариваемых заготовок вызывает появление дефекта в виде линии стыка, который в иностранной литературе описывается как «Lazy S».

Линия стыка – это дефекты, которые проходят от корня шва в месте исходной линии раздела между свариваемыми заготовками через весь шов (рисунок 2). Остатки линии стыка, распределённые по основной части шва, были зафиксированы в нескольких исследованиях во многих сплавах.

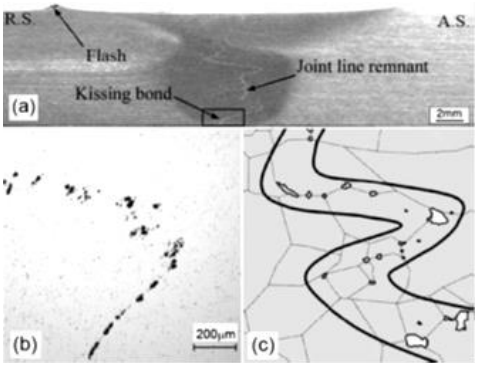


Рис. 2. Оксидный дефект в виде линии стыка в соединении сплава 5083 (a), увеличенное изображение данного дефекта (b) и схема расположения остатка линии стыка (c)

В отдельных ситуациях данное включение может представлять собой цепочку недостаточно фрагментированных оксидных частиц, которые переходят в шов с поверхности подкладки. Исследования с использованием трансмиссионной электронной микроскопии подтвердили, что линия стыка состоит из частиц Al_2O_3.

Отмеченный выше дефект нередко возникает вследствие неверного подбора ключевых режимных параметров сварки. Подобный дефект фиксировался при проведении шва с завышенной скоростью вращения инструмента (в диапазоне 1000–1200 об/мин) на фоне слабого прижима соединяемых деталей.

Характеристики дефекта в виде линии стыка в значительной степени определяются скоростью сварочного процесса. Повышение скорости приводит к уменьшению степени измельчения оксидной пленки на единицу подачи инструмента. Кроме того, на интенсивность этого процесса оказывают влияние диаметр заплечика и форма рабочего инструмента. Однако при условии активного перемешивания участки с распределенным в металле шва оксидом могут не оказывать негативного воздействия на механические характеристики получаемых соединений.

При допущении, что искривленный контур линии стыка возникает за счет остатков оксидной пленки на торцах соединяемых деталей, результат воздействия потока размягченного материала при СТП проявляется в виде изогнутой границы на поперечном разрезе. Данная гипотеза нашла свое подтверждение в ходе опытов с применением индикаторного вещества: тонкая прослойка меди, оказавшись в зоне стыка, позволила с точностью установить ее финальное расположение посредством рентгеновской томографии.

На рисунке 3 представлен кадр рентгеновской томографии сварного соединения сплава 5083, на котором тонкий медный слой задерживается на линии стыка. В поперечном сечении видно, что медь преимущественно распределяется по характерной кривой, которая окаймляет сварной шов с отступающей стороны движения рабочего инструмента.

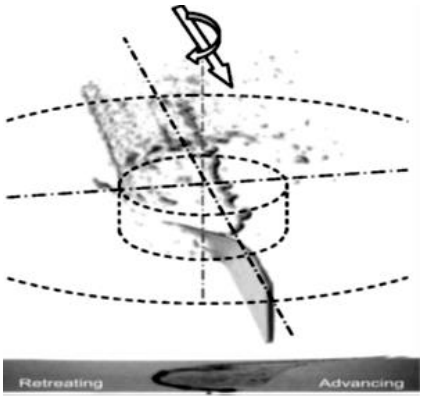


Рис. 3. Рентгеновская томография и соответствующая металлографическая интерпретация механизма течения металла при сварке трением с перемешиванием: вверху – трёхмерное рентгеновское изображение, показывающее разрушение фольги из меди, установленной на линии стыка; внизу – виртуальный поперечный срез сварного соединения, раскрытый с помощью рентгеновской томографии

Из вышеизложенного следует, что линия стыка как оксидная граница между торцевыми поверхностями свариваемых заготовок была разрушена для формирования металлической связи между соединяемыми заготовками.

В ходе сварки длина линии стыка возрастает в 3–5 раз, что приводит к разрушению оксидной пленки на отдельные фрагменты. В большинстве случаев между деталями формируется надежная металлическая связь, гарантирующая требуемую прочность шва. Тем не менее, бывают ситуации, когда оксидный слой повреждается не полностью и остается включенным в металл сварного соединения. Наличие таких остатков линии стыка негативно сказывается на прочностных характеристиках изделия при статическом трехточечном изгибе (СТП).

Дефект в виде линии стыка способен проявиться вследствие смещения оси рабочего инструмента по отношению к плоскости стыка. Как следствие, в металле шва формируется переходная область, где соединение заготовок присутствует, но обладает недостаточной прочностью.

Форма линии стыка хорошо обнаруживается на металлографических шлифах при слабом травлении. При статическом растяжении образцов с таким дефектом поверхность разрушения металла шва повторяет ее очертания. При исследовании поверхности разрушения методом растровой электронной микроскопии было установлено наличие слоев луковичной структуры зоны перемешивания [1–4].

На рисунке 4 показано влияние дефекта «линия стыка» на прочностные свойства стыковых соединений листов сплава 1565чМ толщиной 5 и 10 мм.

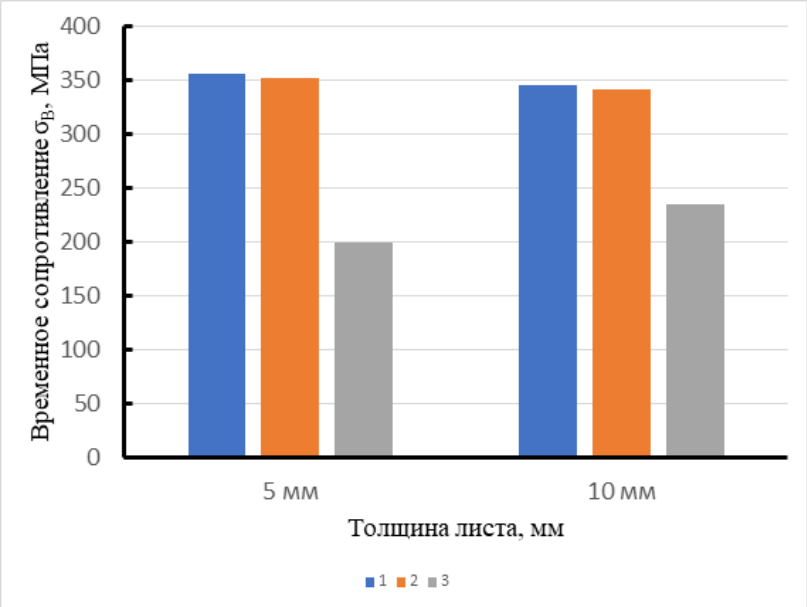


Рис. 4. Статическая прочность стыковых сварных соединений сплава 1565чМ толщиной 5 и 10 мм в зависимости от наличия дефектов:
1 – основной металл; 2 – сварной соединение без дефектов; 3 – сварное соединение с дефектом «линия стыка»

Для определения влияния суммарной длины $L_{оп}$ неразрушенной оксидной пленки были отобраны сварные соединения листов сплава 1565чМ толщиной 10 мм, выполненные на близких режимах и с различной протяженностью неразрушенной оксидной пленкой. В таблице 1 приведены механические свойства сварного соединения в зависимости от длины $L_{оп}$ неразрушенной оксидной пленки (линия стыка).

Из данных таблицы 1 следует, что наиболее чувствительной механической характеристикой по отношению к суммарной длине $L_{оп}$ неразрушенной оксидной пленки (линии стыка) является временное сопротивление сварного соединения и металла шва (зоны перемешивания).

Таблица 1

Влияние дефекта в виде линии стыка на механические свойства сварных соединений сплава 1565чМ толщиной 10 мм. Односторонняя СТП

Суммарная протяженность линии стыка в плоскости шлифа, мм	Временное сопротивление $\sigma_в$ сварного соединения, МПа	Временное сопротивление металла зоны перемешивания $\sigma_в^ш$, МПа	Угол изгиба α, град.	Ударная вязкость KCU по металлу шва, Дж/см^2
0 (сварка по целой пластине)	345,4	375,5	175	22,1
12,5	326,2	344,7	82	18,4
23,4	311,9	315,3	77	17,2
32,7	307,4	312,3	75	16,5

Наиболее высокими значениями временного сопротивления сварного соединения и временного сопротивления металла шва обладают сварные соединения, выполненные односторонней сваркой трением с перемешиванием по целой пластине сплава 1565чМ. При сварке по целой пластине формирование дефекта в виде линии стыка не наблюдалось.

В некоторых образцах средняя длина линии стыка достигала 12,5 мм. Наличие такого дефекта спровоцировало падение предела прочности сварного соединения с 345,4 МПа до 326,2 МПа. Параллельно уменьшилась прочность металла зоны перемешивания (шва) – со 375,5 МПа до 344,7 МПа. При этом пластичность соединения резко упала: угол изгиба сократился почти вдвое, с 175° до 82°. Кинетический коэффициент трещиностойкости (KCU) металла шва также демонстрирует тенденцию к снижению, но в менее выраженной степени.

Дальнейшее увеличение средней суммарной протяженности линии стыка до 23,4 мм приводит к снижению временного сопротивления сварного соединения до 311,9 МПа при временном сопротивлении металла шва 315,3 МПа. При этом снижение угла изгиба сварного соединения и ударной вязкости металла шва не столь существенны, хотя также проявляются.

Продление средней суммарной длины шва стыка до 32,7 мм не приводит к существенному падению предела прочности сварного соединения и металла шва, которые остаются на уровне 307,4 МПа и 312,3 МПа соответственно. Хотя

абсолютные показатели угла изгиба и ударной вязкости по металлу шва также уменьшаются, это снижение носит незначительный характер.

При растяжении образцов с сварным швом была зафиксирована определённая закономерность разрушения. Установлено, что трещина сначала распространяется от корня шва по поверхности сопряжения, упомянутой ранее, а затем – по основному металлу шва, что хорошо заметно на рисунке 5. Тем не менее, разрушение всегда стартует с корня шва вдоль поверхности, содержащей оксидные образования.

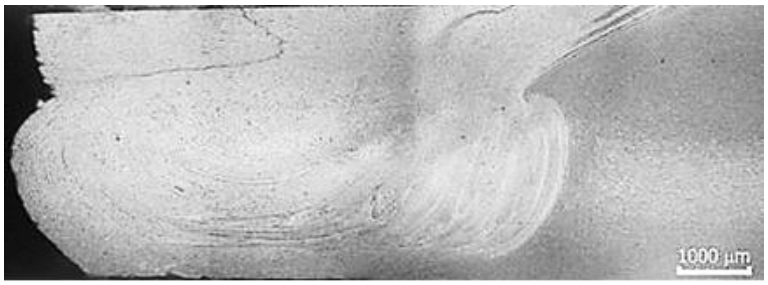


Рис. 5. Разрушение сварного шва сплава 1565чМ с дефектом в виде линии стыка при испытании на растяжение

С целью установления факторов, провоцирующих указанный тип разрушения, были изготовлены образцы для проведения металлографического исследования поверхностей сварного соединения сверху и снизу. Перед началом испытаний материал подвергался механической шлифовке, полировке и химическому травлению для обеспечения четкой визуализации макроструктуры шва. На рисунке 6 показана нижняя зона сварного соединения.

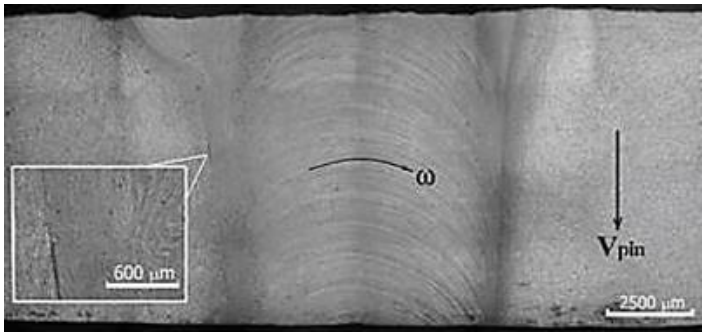


Рис. 6. Нижняя часть сварного шва. Слой толщиной 0,6 мм снят путём фрезерования

Макроструктура в средней и нижней зонах шва, как отмечалось ранее, формируется за счёт вращения стержня (штифта), что обуславливает кольцеобразное строение металла в направлении перемещения штифта. Границы соединения чётко выражены. На левой стороне границы наблюдается расслоение (обозначено на выносе), спровоцированное присутствием оксидов на торцевых поверхностях свариваемых листов – именно это и стало причиной появления начальной трещины при растяжении.

Макроструктура в верхней зоне сварного шва отличается от описанной ранее. Поскольку пластическое деформирование металла в этой области обусловлено трением скольжения поверхностей заплечика по поверхности свариваемых листов, кольцеобразной структуры не наблюдается. Вместо неё отчётливо выделяются чередующиеся полосы на границе шва с основным металлом, формирование которых обусловлено нанесением металла с внешней стороны плечиков, где температурные условия сварки отличаются от тех, что в центральной части шва.

Судя по рисунку 5, разрушение в верхней части произошло на значительном удалении от зоны скопления оксидов. Подробный анализ данной зоны позволил установить отсутствие расслоения металла. С учётом общих закономерностей ясно, что прочность металла в участках с оксидами ниже, чем у сварного шва без дефектов. Тем не менее, разрушение в верхней части шва произошло именно в теле металла шва, но вне зоны накопления оксидов. Вероятным представляется предположение, что более энергетически выгодным является разрушение с образованием поверхности минимальной площади (см. рисунок 5). Учитывая сильно искривлённую форму поверхности, образованной оксидами, как это видно на всех изображениях, указанное допущение представляется наиболее обоснованным.

При испытании образцов сварных швов на растяжение была зафиксирована дополнительная особенность, связанная с характером поверхности разрушения. На рисунке 7 представлена топография повреждённой поверхности, которая условно разделена на три зоны. Первоначальный дефект образовался в корне шва (зона 1) в области наличия несплошности, упомянутой ранее. Далее разрушение распространялось вдоль поверхности, содержащей оксидные включения, между слоями «луковичной» структуры. Гладкая текстура поверхности в данной зоне указывает на расслоение металла, вызванное присутствием оксидов. Поверхность разрушения в зоне 2 характерна для вязкого механизма разрушения. Завершается процесс в верхней части шва (зона 3), где формируется рельефная поверхность, напоминающая резьбу винтового бура.

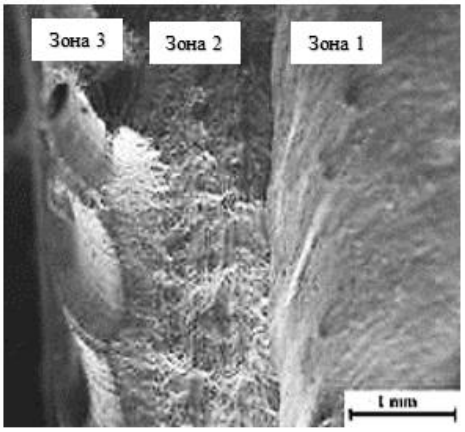


Рис. 7. Рельеф поверхности разрушения сварного соединения, выполненного методом сварки трением с перемешиванием

Как отмечалось ранее, макроструктура сварного соединения, сформированного методом СТП, свидетельствует о том, что она сформировалась вследствие пластической деформации материала под действием вращающегося инструмента. Подтверждением этому служит вихревая структура металла шва, наглядно представленная на рисунках 5 и 6.

Диаметр зоны соединения варьируется в зависимости от удалённости от заплечика инструмента и обусловлен различной интенсивностью тепловыделения в поперечном сечении металла. Фрикционное нагревание в зоне шва снижает предел текучести материала, что способствует его пластическому течению под воздействием сил трения. Учитывая, что диаметр заплечика значительно больше диаметра штифта, зона тепловыделения при трении заплечика о поверхность свариваемых заготовок охватывает область большего диаметра по сравнению с нижележащей зоной. В результате формируется деформированная область, напоминающая по форме гриб.

Значения ограниченного предела выносливости в зависимости от протяженности линии стыка в поперечном сечении соединений приведены на рисунке 8.

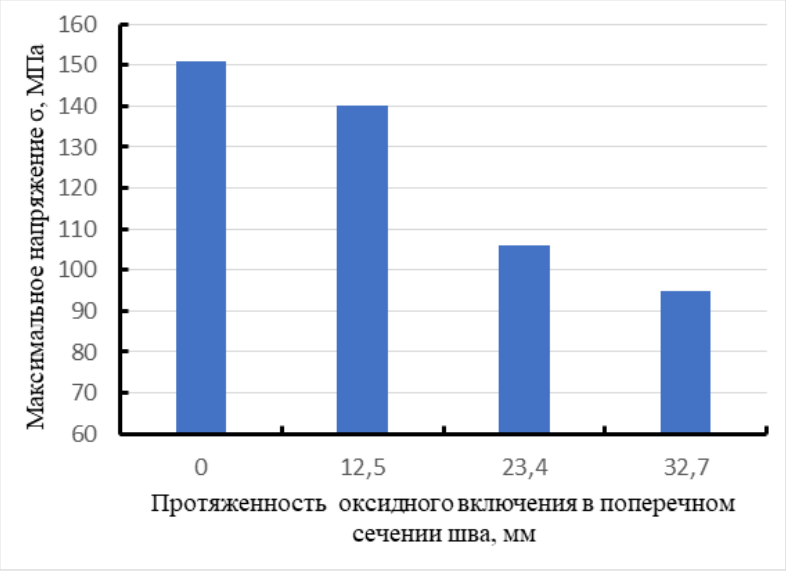


Рис. 8. Зависимость ограниченного предела выносливости сварных соединений листов сплава 1565чМ от протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва (зона перемешивания от 0 до 12,5 мм значения ограниченного предела выносливости снижаются со 151 МПа до 140 МПа. Это снижение составило примерно 7%.

Дальнейшее увеличение протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва до 23,4 мм привело к снижению значения ограниченного предела выносливости до 105 МПа (уже на 30% от значения для бездефектного шва).

Увеличение протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва до 32,7 мм сопровождалось снижением значения ограниченного

предела выносливости до 95 МПа (на 37% от значения для бездефектного шва). Из этого следует, что увеличение протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва с 23,4 до 32,7 мм вызвало снижение значения ограниченного предела выносливости на 7%.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что наиболее существенное снижение значения ограниченного предела выносливости произошло в диапазоне изменения протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва 12,5–23,4 мм.

Установленная зависимость значения ограниченного предела выносливости от протяженности оксидного включения в поперечном сечении шва указывает на ее связь с механизмом разрушения соединения при приложении циклических нагрузок. Усталостная трещина сначала распространяется от корня шва по поверхности сопряжения с оксидной пленкой примерно до середины толщины шва, а затем – по металлу шва с выходом в зону термомеханического воздействия соединения.

В таблице 2 представлено влияние асимметрии цикла испытаний на сопротивление усталости сварных образцов листов сплава 1565чМ с различной протяженностью оксидного включения в поперечном сечении зоны перемешивания. Можно отметить, что с увеличением коэффициента асимметрии цикла с –1,0 до 0,5 наблюдается увеличение ограниченного предела выносливости как для бездефектного сварного соединения, так и для соединения с различной протяженностью оксидного включения в зоне перемешивания сварного соединения.

Таблица 2

Влияние коэффициента асимметрии цикла на значение ограниченного предела выносливости сварного соединения листов сплава 1565чМ

Коэффициент асимметрии *r*	Дисперсность нагрузок *T*	Ограниченный предел выносливости сварного соединения σ, МПа		
		Протяженностью оксидного включения в поперечном сечении зоны перемешивания, мм		
		0	12,5	23,4
–1,0	1:1,26	77	71	54
0,1	1:1,19	125	115	87
0,5	1:1,21	151	123	105

Список литературы

1. Феофанов А.Н. К вопросу образования несплавлений и пустот в сварных швах алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием. / А.Н. Феофанов, В.В. Овчинников, Р.Б. Резцов, Д.М. Богуш. // Сварочное производство. 2025. №4. – С. 5–12.

2. Дриц А.М., Овчинников В.В., Резцов Р.Б. Дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов системы Al–Mg, и способы их устранения. // Технология легких сплавов. 2022. – №4. – С. 14–25. DOI: 10, 24412/0321-4664-2022-4-14-25.

3. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg alloy / H.L. Hao, D.R. Ni, H. Huang, D. Wang, B.L. Xiao, Z.R. Nie, Z.Y. Ma // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 559. – P. 889–896. – doi: 10, 1016/j.msea.2012.09.041.

4. Дриц А.М., Овчинников В.В., Резцов Р.Б. Влияние дефектов в корневой части соединений плит из сплава 1901Т, выполненных односторонней сваркой трением с перемешиванием, на их механические свойства. // Технология легких сплавов. 2023. – №4. – С.52–60, DOI: 10, 24412/0321-4664-2023-4-52-60.

Быкова А.Е.
инженер
Московский политехнический университет
Россия, Москва
anna1-2016@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В РАЗНОИМЕННОМ СОЧЕТАНИИ, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы формирования сварных соединений литейных алюминиевых сплавов (ВАЛ10, АЛ19, ВАЛ16) в разноимённом сочетании методом сварки трением с перемешиванием (СТП). Проведён анализ механических свойств полученных соединений, включая предел прочности, коэффициент прочности, угол изгиба и ударную вязкость. Установлено, что СТП обеспечивает получение качественных стыковых соединений, уровень механических свойств которых превосходит аналогичные показатели для аргонодуговой сварки. Коэффициенты прочности соединений для исследованных сплавов составляют 79,2% (ВАЛ10), 81,3% (АЛ19) и 96,7% (ВАЛ16). Определено, что расположение менее прочного сплава со стороны набегания рабочего инструмента приводит к снижению прочности и ударной вязкости металла шва. Проведён микрорентгеноспектральный анализ, показавший ограниченную диффузию элементов на границе свариваемых сплавов. Результаты исследования подтверждают перспективность применения СТП для создания литосварных конструкций из разноимённых литейных алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: литосварные конструкции, литейные алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием, разноимённое сочетание, механические свойства, коэффициент прочности, микрорентгеноспектральный анализ.

Bykova A.E.
Engineer
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
anna1-2016@mail.ru

Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF CAST ALUMINUM ALLOYS IN A DIFFERENT COMBINATION, PERFORMED BY FRICTION STIR WELDING

Abstract. The article discusses the formation of welded joints of cast aluminum alloys (VAL10, AL19, VAL16) in a different combination by friction stir welding (SHWW). An analysis of the mechanical properties of the obtained joints, including tensile strength, strength factor, bending angle and toughness, was carried out. It has been established that STP provides the production of high-quality butt joints, the level of mechanical properties of which exceeds those for argon arc welding. The strength coefficients of the joints for the studied alloys are 79.2% (VAL10), 81.3% (AL19) and 96.7% (VAL16). It has been determined that the location of a less strong alloy on the side of the impact of the working tool leads to a decrease in the strength and toughness of the weld metal. A micro-X-ray spectral analysis was carried out, which showed a limited diffusion of elements at the interface of welded alloys. The results of the study confirm the prospects of using STP for the creation of cast welded structures from casting aluminum alloys of various names.

Keywords: cast welded structures, cast aluminum alloys, friction stir welding, various combinations, mechanical properties, strength factor, micro-X-ray spectral analysis.

Литосварные конструкции, представляющие собой рациональное сочетание литых и деформированных (сварных) элементов, занимают особое место в современном машиностроении, судостроении, авиационной и космической технике. Основой для широкого внедрения таких гибридных решений служат литейные алюминиевые сплавы, обладающие уникальным комплексом физико-механических и технологических свойств.

Ключевым преимуществом литейных алюминиевых сплавов является их высокая жидкотекучесть, что позволяет получать фасонные отливки сложной конфигурации с минимальными припусками на механическую обработку. Это обеспечивает значительную экономию металла и снижение трудоемкости изготовления деталей по сравнению с традиционными методами резания из поковок или проката.

В составе литосварных конструкций литые элементы, как правило, выполняют функции массивных узлов, оснований, кронштейнов, корпусных деталей и других конструктивных элементов, воспринимающих высокие статические и динамические нагрузки. Сварные же элементы из деформированных полуфабрикатов (листов, профилей) используются для создания тонкостенных силовых каркасов, обшивок и соединительных деталей. Такое разделение функций позволяет оптимизировать массу конструкции, сочетая высокую жесткость и прочность литых узлов с легкостью и технологичностью сварных рам.

Наиболее распространенными литейными алюминиевыми сплавами для этих целей являются силумины (система Al–Si, например, АК12, АК9ч) и сплавы системы Al–Cu (например, АМ5). Силумины отличаются хорошими литейными свойствами, коррозионной стойкостью и умеренной прочностью. Сплавы системы Al–Cu обеспечивают более высокие прочностные характеристики, но уступают силуминам в технологичности литья.

Соединения в одноименном сочетании (сварка или пайка деталей из одного и того же сплава) являются наиболее распространенным и технически простым решением. Их применение обусловлено необходимостью:

– Герметизации: устранения пористости и микротрещин в литой заготовке путем заварки дефектных участков.

– Увеличения габаритов: соединения нескольких литых или литой и деформированной деталей для получения крупногабаритных конструкций.

– Восстановления: ремонта и восстановления изношенных или поврежденных участков отливок.

При сварке одноименных сплавов обеспечивается максимальная совместимость химического состава и, как следствие, предсказуемость структуры и свойств сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Это позволяет гарантировать сохранение исходного уровня механических характеристик конструкции.

Несмотря на техническую простоту одноименных соединений, наиболее перспективным направлением является создание конструкций с применением разноименных сочетаний литейных сплавов. Эта необходимость диктуется следующими факторами:

1. Функциональное зонирование конструкции. Различные узлы литосварной конструкции могут работать в разных условиях: одни подвержены интенсивному нагреву в процессе эксплуатации, другие – высоким статическим нагрузкам, третьи – знакопеременным нагрузкам. Использование в одном узле двух разных литейных сплавов позволяет оптимально подобрать материал для каждой функциональной зоны. Например, к износостойкому элементу из заэвтектического силумина (с высоким содержанием кремния) может привариваться силумин с лучшими литейными свойствами для формирования основной массы детали.

2. Оптимизация массогабаритных и стоимостных показателей. Применение дорогостоящего высокопрочного сплава (например, АМ5) только в наиболее нагруженных участках, а в остальных – более дешевого и технологичного силумина (например, АК9ч), позволяет существенно снизить себестоимость изделия без потери его эксплуатационной надежности.

3. Расширение конструктивных возможностей. Комбинирование материалов дает инженерам большую свободу при проектировании сложных узлов, позволяя интегрировать детали с принципиально разными свойствами в единую монолитную конструкцию.

Таким образом, развитие технологий сварки, в частности сварки трением с перемешиванием (Friction Stir Welding – FSW), открывает новые горизонты для создания высокоэффективных литосварных конструкций. Способность формировать качественные неразъемные соединения как в одноименных, так и, что особенно важно, в разноименных сочетаниях литейных алюминиевых сплавов является ключевым фактором для реализации принципов бионического и функционально-ориентированного проектирования современных изделий.

Применение процесса сварки трением с перемешиванием (СТП) позволило существенно повысить качество и уровень механических свойств соединений из деформируемых алюминиевых сплавов. В тоже самое время процессу СТП литейных алюминиевых сплавов уделяется существенно меньшее внимание.

Целью данной работы является исследование возможности сварки литейных алюминиевых сплавов сваркой трением с перемешиванием (СТП) в разноименном сочетании и оценка механических свойств полученных соединений.

Для осуществления исследования использовались отливки размером 100х300 мм и толщиной 15 мм, получаемые из сплавов ВАЛ10, ВАЛ16 и АЛ19 методом литья в землю. Химический состав исследуемых сплавов приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Легирующие элементы, масс%							Примеси	
	Al	Mn	Ti	Cu	Mg	Zn	Cd	Fe	Si
ВАЛ10	Осн.	0,55	0,19	4,92	≤ 0,05	≤ 0,1	0,13	≤ 0,15	≤ 0,10
ВАЛ16	Осн.	0,12	0,22	–	8,3	2,2	–	≤ 0,15	≤ 0,10
АЛ19	Осн.	0,82	0,21	4,78	≤ 0,05	≤ 0,2	–	≤ 0,20	≤ 0,30

Отливки подвергались термической обработке по режиму закалка + искусственное старение. Режимы термической обработки для исследуемых сплавов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы термической обработки исследуемых литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Параметры режима термической обработки	
	Закалка	Искусственное старение
ВАЛ10	535±5°С, выдержка 7 часов + 545 ºС, 9 часов, охлаждение в воде при температуре 45–50°С	160 ºС, 4 часа, охлаждение на воздухе
ВАЛ16	460±5°С, выдержка 3 часа, охлаждение в воде при температуре 45–50°С	160 ºС, 2 часа, охлаждение на воздухе
АЛ19	540±5°С, выдержка 12 часов, охлаждение в воде при температуре 80°С	250 ºС, 5 часов, охлаждение на воздухе

Перед сваркой выполняли фрезерование свариваемых заготовок до толщины 7 мм. Это позволило полностью устранить с поверхности заготовок литейную корку. Кроме того, данная толщина основного металла используется в ряде узлов из литейных алюминиевых сплавов ответственного назначения. В таблице 3 представлены механические свойства основного металла до сварки.

Таблица 3

Механические свойства литейных алюминиевых сплавов после термической обработки

Марка сплава	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ_5,%	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2
ВАЛ10	450	320	5	12,5
ВАЛ16	316	180	8	29,4
АЛ19	360	260	5	11,8

Сварку образцов трением с перемешиванием осуществляли на экспериментальной установке, созданной на базе модернизированного вертикального фрезерного станка с ЧПУ. В качестве рабочего инструмента использовали специальный инструмент, состоящий из стержня диаметром 6 мм и длиной 6,7 мм с винтовой канавкой глубиной 0,4 мм. Диаметр заплечика инструмента составлял 22 мм. Рабочий инструмент был изготовлен из стали Р6М5.

Сварку исследуемых образцов осуществляли на режиме: частота вращения рабочего инструмента – 850 об/мин; скорость сварки – 95–120 мм/мин; усилие прижима инструмента к поверхности свариваемых заготовок – 25 кН.

После сварки все образцы подвергались рентгеновскому контролю. Механические свойства сварных соединений и основного металла определяли на плоских образцах по ГОСТ 6669–66 толщиной 7 мм.

Прочностные испытания проводились на универсальной машине для испытания конструкционных материалов УТС 110М-100 для определения механических характеристик образцы подвергали одноосному растяжению до разрушения при нарастающей нагрузке. Скорость нагружения составляла 15 мм/мин.

Свойства металла шва определяли на плоских образцах, имеющих специальную выборку в области сварного шва и вырезанных поперек направления сварки (рис. 1).

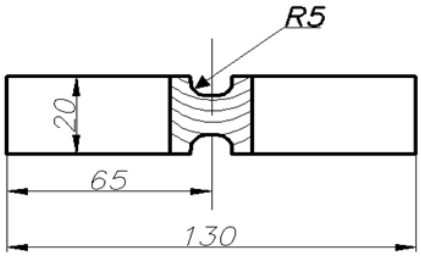


Рис. 1. Образец для определения предела прочности металла шва

Для определения плотности металла зоны перемешивания при различном уровне пористости в основном металле литейного алюминиевого сплава использовали метод гидростатического взвешивания образцов размером 4х4х10 мм.

Механические свойства сварных соединений исследуемых алюминиевых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Механические свойства сварных соединений сплавов ВАЛ10, АЛ19 и ВАЛ16

Вид образца	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, МПа		Коэффициент прочности сварного соединения К	Угол изгиба α, град.	Ударная вязкость *KCU* шва, Дж/см^2
	Сварное соединение	Металл шва			
Сплав ВАЛ10					
Сварное соединение СТП	334,6	336,7	74,2	55	60,2
Сплав АЛ19					
Сварное соединение СТП	291,6	302,5	81,3	60	54,9
ВАЛ16					
Сварное соединение СТП	305,6	326,4	96,7	134	81,2

Из данных таблицы 4 следует, что коэффициент прочности сварного соединения сплава ВАЛ16, выполненного СТП, составляет 74,2% и превышает значение коэффициента прочности соединения, полученного автоматической аргонодуговой сваркой (44,8%).

Разрушение образцов сварных соединений СТП происходило в зоне термомеханического влияния на «отступающей» стороне относительно линии стыка.

Следует отметить, что предел прочности металла шва для сплава ВАЛ10 при сварке трением с перемешиванием существенно превосходит прочность металла шва при аргонодуговой сварке, а также предел прочности сварного соединения.

При этом отмечается увеличение угла изгиба сварного шва по сравнению с основным металлом с 27 до 55°, т.е. практически в 2 раза. Наблюдается также увеличение значений ударной вязкости металла шва по сравнению с основным металлом с 12,5 до 60,2 Дж/см^2.

Для сплава АЛ19 коэффициент прочности соединения составил 81,3%. Хотя при этом абсолютные значения прочности сварного соединения и прочности металла шва для сплава АЛ19 меньше аналогичных показателей для сплава ВАЛ10,

Коэффициент прочности сварных соединений сплава ВАЛ16 имеет высокие для сварки трением с перемешиванием. Разрушение образцов сварных соединений при испытаниях на статическую прочность происходит по основному металлу на расстоянии 3–7 мм от границы шва.

Для сварных соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием, прочность металла шва составляет 326,4 МПа и существенной превосходит прочность сварного соединения (305,6 МПа). При этом отмечается существенное увеличение пластических свойств соединений – возрастает величина угла изгиба и ударной вязкости.

Отмеченное одновременное увеличение прочностных и пластических свойств металла шва при сварке трением с перемешиванием является следствием формирования ультрамелкодисперсной структуры в процессе сварки трением с перемешиванием. Помимо измельчения зерна и интерметаллидных фаз во время СТП, происходят сложные процессы фазовых превращений, зависящие от температуры, до которой нагревается металл: отжиг, возврат, распад твердого раствора и т.д. Совокупность этих процессов определяет свойства и место разрушения. Отличие СТП от сварки плавлением в температурах нагрева в зоне формирования шва и химическом составе металла шва (он при СТП полностью аналогичен химическому составу основного металла).

На рис. 2 приведены значения плотности материала отливок из исследуемых сплавов в сопоставлении с плотностью металла шва.

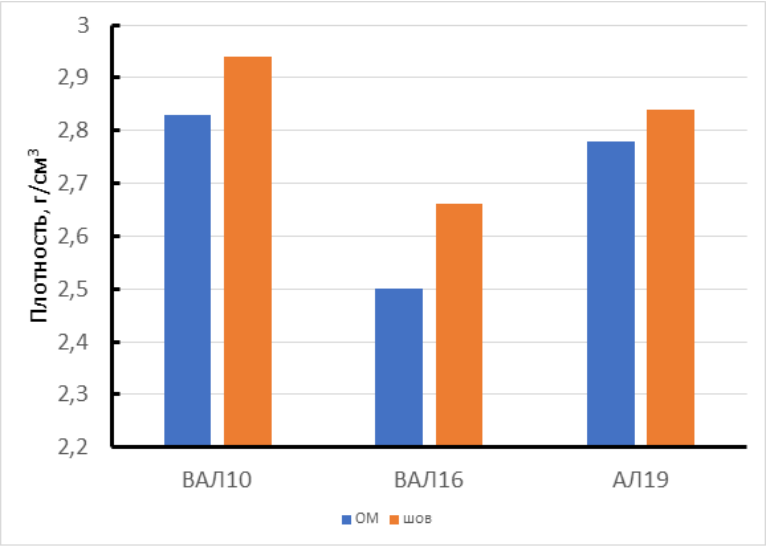


Рис. 2. Плотность основного металла (ОМ) и металла зоны перемешивания (шов) исследуемых литейных алюминиевых сплавов

Из приведенных на диаграмме данных можно заключить, что для всех исследуемых алюминиевых сплавов плотность металла шва превышает плотность основного металла. Наибольшая разность между плотностями основного металла и металла зоны перемешивания наблюдается для сплава

ВАЛ16. Установленная разница в плотностях основного металла и металла зоны перемешивания для сплава ВАЛ16 составила 6–6,5%.

Установлено, что сварка трением с перемешиванием обеспечивает получение качественных стыковых сварных соединений литейных алюминиевых сплавов ВАЛ10, АЛ19 и ВАЛ16.

Коэффициент прочности сварных соединений сплавов ВАЛ10, АЛ19 и ВАЛ16, выполненных сваркой трением с перемешиванием, составляет 79,2, 81,3 и 96,7% соответственно.

Плотность металла шва соединений исследуемых сплавов, выполненных сваркой трением с перемешиванием, превышает плотность основного металла отливки [1, 2].

Механические свойства сварных соединений литейных алюминиевых сплавов в разноименном сочетании представлены в табл. 5. При выполнении соединений оценивали влияние расположения свариваемых сплавов относительно направления вращения рабочего инструмента, т.е. расположение сплава со стороны набегания или отхода рабочего инструмента в соответствии с рис. 3.

Таблица 5

Механические свойства сварных соединений литейных алюминиевых сплавов в разноименном сочетании

Сочетание сплавов	Сплав со стороны набегания	Предел прочности при растяжении $\sigma_в$, МПа		Угол изгиба α, град.	Ударная вязкость KCU шва, Дж/см^2
		Сварное соединение	Металл шва		
ВАЛ10+ВАЛ16	ВАЛ10	314,6	339,4	73	68,3
	ВАЛ16	307,4	325,3	88	72,4
ВАЛ10+АЛ19	ВАЛ10	235,7	289,9	46	55,7
	АЛ19	224,9	249,8	40	53,2
ВАЛ16+АЛ19	ВАЛ16	246,1	291,1	89	73,2
	АЛ19	225,4	249,5	58	59,3

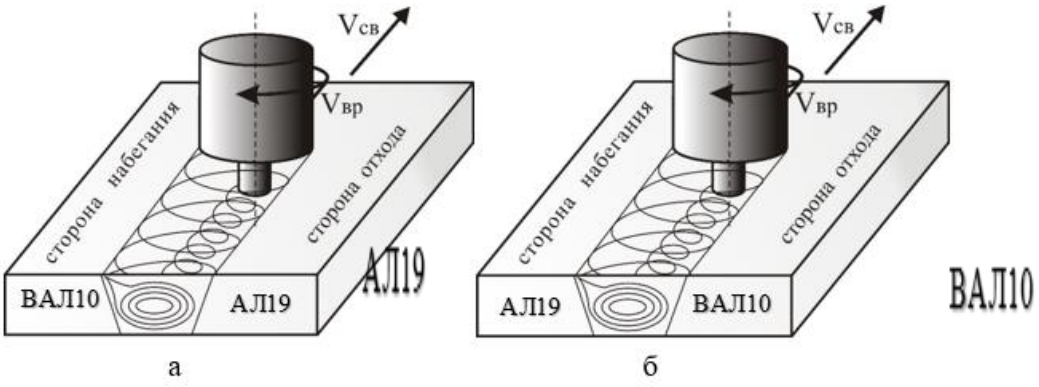


Рис. 3. Схема сварки сочетания сплавов ВАЛ10 и АЛ19:
а – набегание со стороны сплава ВАЛ10; б – набегание со стороны сплава АЛ19

Предел прочности сварного соединения в разноимённом сочетании алюминиевых сплавов, как правило, не превышает прочности менее прочного из двух сплавов (таблица 5). Это связано с тем, что разрушение происходит по слабому звену – либо по шву, либо по зоне термического влияния менее прочного материала.

Из данных таблицы 5 следует, что предел прочности металла шва при сварке трением с перемешиванием для исследованных сочетаний сплавов при СТП превышает прочность менее прочного сплава в сочетании [3]. Кроме того, четко проявляется зависимость прочности сварного шва от расположения более прочного сплава по отношению к направлению вращения рабочего инструмента. Эксперименты показали, что прочность сварного соединения повышается при расположении более прочного сплав со стороны набегания рабочего инструмента.

Макроструктура сварного соединения сплавов АЛ19 и ВАЛ10 приведена на рис. 4.

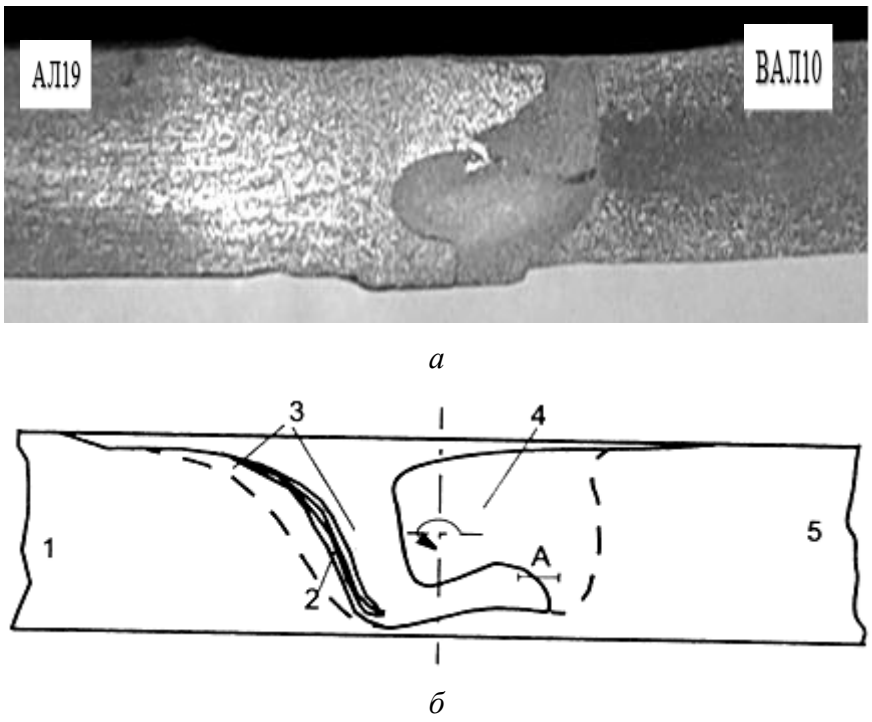
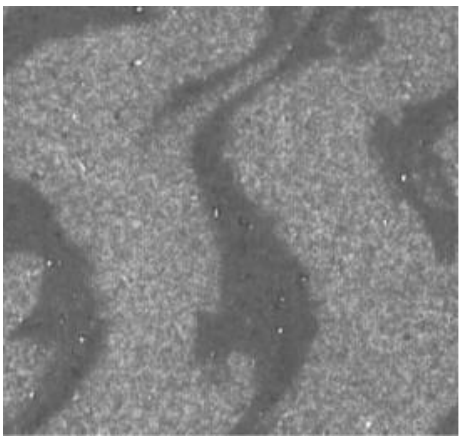
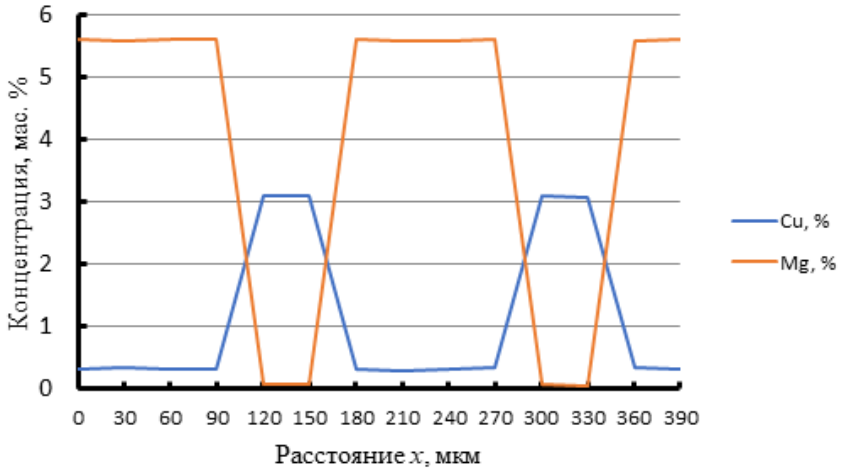


Рис. 4. Макроструктура соединения сплава ВАЛ10 и АЛ19 в разноименном сочетании (а) и схема соединения ВАЛ10+АЛ19 (б). Пунктиром показана зона шва (зона перемешивания)

В рамках данной работы был проведен анализ изменения химического состава сварного шва соединения ВАЛ10 + АЛ19 вдоль направления сварки (рисунок 5).



а



б

Рис. 5. Траки магния (светлые) и меди (темные) на рентгеновской карте (а) и в продольном сечении (б) шва сплавов сварного соединения ВАЛ10 + АЛ19

Определение концентрации меди и магния с помощью микрорентгеноспектрального анализа на границе соседних слоев показало, что наблюдается четкая черта между соседними полосами с ограниченной диффузией элементов между полосами (рис. 5, *б*). В процессе анализа не удалось установить наличие областей с промежуточным химическим составом.

1. Установлено, что сварка трением с перемешиванием обеспечивает получение качественных стыковых сварных соединений литейных алюминиевых сплавов ВАЛ10, АЛ19 и ВАЛ16. Уровень механических свойств соединений СТП указанных сплавов превосходит уровень механических свойств соединений, выполненных аргонодуговой сваркой.

2. Коэффициент прочности сварных соединений сплавов ВАЛ10, АЛ19 и ВАЛ16, выполненных сваркой трением с перемешиванием, составляет 79,2, 81,3 и 96,7% соответственно.

3. Разрушение образцов сварных соединений СТП сплавов ВАЛ10 и АЛ19 происходило в зоне термомеханического влияния на «отступающей» стороне по линии стыка, а сплава ВАЛ16 по основному металлу.

4. Расположение менее прочного сплава со стороны набегания рабочего инструмента способствует снижению предела прочности металла шва. Одновременно наблюдается снижение ударной вязкости металла шва. Указанные явления связаны с ростом доли участия менее прочного сплава в формировании шва структуры шва.

Список литературы

1. Овчинников В.В. Технологические особенности сварки трением с перемешиванием алюминиевых и магниевых сплавов. // Машиностроение и инженерное образование. 2016. – №4. – С.22–45.

2. Быкова А.Е., Овчинников В.В., Скакова Т.Ю. Технологические особенности аргонодуговой сварки высокопрочных литейных алюминиевых сплавов. // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. 22. №10, С.442–450, DOI: 10, 36652/1684-1107-2024-22-10-442-450,

3. Bykova A. E., Ovchinnikov V.V., Skakova T. Yu. Friction Stir Welding of Cast Aluminum Alloys Friction Stir Welding of Cast Aluminum Alloys. // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2025, No. 6, pp. 1351–1358. DOI: 10, 1134/S0036029525702325.

Пинясова М.А.
помощник проректора
Московский политехнический университет
Россия, Москва
pinyasova.marina@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16 И 1163, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования механических свойств и сопротивления усталости стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов Д16 и 1163, полученных методом сварки трением с перемешиванием (СТП). Рассмотрены особенности формирования неразъёмных соединений в твёрдой фазе, что позволяет избежать характерных дефектов, присущих сварке плавлением (пор, макровключений оксидной плёнки, горячих трещин). Проведены сравнительные испытания соединений, выполненных *СТП* и аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом (ААрДС), на статическое растяжение и циклическую нагрузку. Установлено, что сварные соединения, полученные СТП, обладают более высокими показателями прочности, пластичности и усталостной долговечности, а также демонстрируют минимальную концентрацию напряжений в зоне шва. Показано, что предел ограниченной выносливости соединений, выполненных СТП, составляет 85% от аналогичного показателя основного металла, что

на 15% выше по сравнению с ААрДС. Сделан вывод о преимуществах применения СТП для соединения тонколистовых алюминиевых сплавов в ответственных конструкциях.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, тонкий лист, сплав Д16, сплав 1163, сварка трением с перемешиванием, испытания на статическую прочность, предел ограниченной выносливости.

MECHANICAL PROPERTIES OF BUTT JOINTS OF THIN-SHEET ALUMINUM ALLOYS D16 AND 1163 OBTAINED BY FRICTION STIR WELDING

Pinyasova M.A.
Assistant Vice-Rector
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
pinyasova.marina@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the mechanical properties and fatigue resistance of butt joints of thin-sheet aluminum alloys D16 and 1163 obtained by friction stir welding (SHWW). The features of the formation of inseparable joints in the solid phase are considered, which makes it possible to avoid characteristic defects inherent in fusion welding (pores, macro-inclusions of the oxide film, hot cracks). Comparative tests of joints made by *STP* and argon arc welding with a non-consumable electrode (AArDS) for static tension and cyclic load are carried out. It has been established that welded joints obtained by STP have higher strength, ductility and fatigue life, and also demonstrate a minimum concentration of stresses in the weld area. It is shown that the limit of the limited endurance of joints made by STP is 85% of the same indicator of the base metal, which is 15% higher in comparison with AArDS. A conclusion is made about the advantages of using STP for joining thin-sheet aluminum alloys in critical structures.

Keywords: aluminum alloys, thin sheet, alloy D16, alloy 1163, friction stir welding, static strength tests, limit of endurance.

Алюминиевые сплавы служат основным конструкционным материалом в авиакосмической отрасли и активно используются при производстве различной транспортной техники, обеспечивая высокую прочность, износостойкость и минимальный вес конструкций. К числу наиболее востребованных относится сплав Д16, входящий в систему Al–Cu–Mg, отличающийся оптимальным сочетанием усталостной прочности, вязкости хрупкого разрушения и сопротивления развитию усталостных трещин. Тем не менее, из-за склонности к образованию кристаллизационных трещин он относится к сплавам, непригодным для сварки плавлением [1–3].

Избежать плавления металла в зоне формирования неразъемного соединения удалось благодаря разработанному в 1991 году в британском институте новому методу сварки трением с перемешиванием (СТП) [4]. Образование шва происходит в твердой фазе за счет нагрева небольшого объема

материала трением до состояния пластичности, последующего перемешивания в пределах всей толщины кромок и деформирования в замкнутом пространстве.

Благодаря этим особенностям технология СТП обладает значительными преимуществами перед сваркой плавлением: отсутствие дефектов в швах – пор, макровключений оксидной плёнки, горячих трещин, формирование мелкозернистой структуры шва, уменьшение степени ослабления материала в зоне соединения и повышение эксплуатационных характеристик соединений [5–9].

Целью настоящего исследования является установление механических характеристик и показателей сопротивления усталости стыковых соединений тонколистовых алюминиевых сплавов Д16 и 1163, выполненных методом сварки трением с перемещением.

В ходе исследований применялись листы конструкционных алюминиевых сплавов Д16 и 1163 толщиной 2 мм. Сварку стыковых соединений данных листов при толщине 2 мм проводили со скоростью 10 м/ч с использованием разработанной лабораторной установки на базе модернизированного вертикального фрезерного станка.

Частота вращения специального инструмента с коническим наконечником и заплечиком диаметром 14 мм составляла 1000 об/мин. Для сравнения аналогичные соединения формировали аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом при скорости 20 м/ч, токе дуги 160–170 А и применении установки MW-450 («Fronius», Австрия).

В качестве присадки применялась лента из основного материала, что обеспечивало сохранение неизменности химического состава металла шва. При этом средняя ширина швов, выполненных ААрДС, составляла 6,0–6,5 мм, а при сварке СТП – 3,5 мм (при ширине зоны термомеханического воздействия с лицевой стороны шва около 14 мм).

В таблице 1 приведен химический состав исследуемых сплавов, а в таблице 2 – механические свойства основного металла.

Таблица 1

Химический состав листов сплавов Д16 и 1163 (по ГОСТ 4784–2019)

Марка сплава	Содержание легирующих элементов,% масс.									
	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Примеси	
									каждая	всего
Д16	≤0,5	≤0,5	0,3–0,9	≤0,1	≤0,15	3,8–4,9	1,2–1,8	≤0,25	0,05	0,15
1163	≤0,15	≤0,10	0,5–0,8	≤0,05 Ni	0,01–0,07	4,1–4,5	1,3–1,6	≤0,10	0,05	0,15

Таблица 2

Механические свойства листов сплавов Д16 и 1163

Марка и состояние сплава	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ,%	Ударная вязкость *KCU*, кДж/м^2	Твердость по Бринеллю, НВ
Д16Т	480	350	13	150	120–130
1163Т	430	290	13	165	100–110

Из изготовленных сварных соединений готовили шлифы для анализа структуры и образцы с рабочей шириной 15 мм для определения предела прочности при одноосном растяжении по ГОСТ 6996–66. Испытания механических свойств проводили на универсальном сервогидравлическом комплексе MTS 318.25.

Циклические испытания проводили при осевой нагрузке, изменяющейся по синусоидальному закону, с коэффициентом асимметрии $R\sigma = 0{,}1$ и частотой 15 Гц, до полного разрушения образцов. Экспериментальные результаты усталостных испытаний обрабатывали с использованием методов линейного регрессионного анализа, традиционно применяемых в подобных исследованиях.

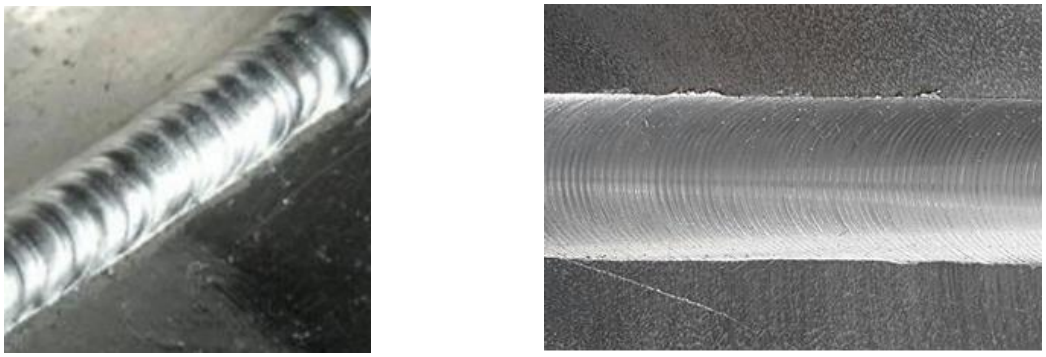
В результате проведённых испытаний для каждой серии образцов по установленным пределам выносливости строилась кривая усталости – линия регрессии в системе координат $2\sigma a - \lg N$.

Твердость металла измеряли на лицевой поверхности зачищенных соединений. Степень разупрочнения металла в зоне сварки оценивали на приборе «ROCKWELL» при нагрузке $P = 600$ Н.

Оценку структурных особенностей сварных соединений осуществляли с помощью оптического инверсированного микроскопа GX61 фирмы Olympus.

По результатам проведённых исследований выявлено, что форма и геометрические параметры шва при сварке плавлением значительно превосходят аналогичные показатели, полученные при сварке плавлением, за счёт формирования шва на подкладке с канавкой и создания неразъёмного соединения без использования присадочной проволоки (рис. 1). Отсутствие усиления на шве исключает образование зон высокой концентрации напряжений при переходе от шва к основному материалу, что негативно сказывается на эксплуатационных показателях сварных соединений (рис. 2).

Кроме того, формирование неразъёмных соединений в твёрдой фазе без плавления основного материала исключает появление характерных дефектов, свойственных сварке алюминиевых сплавов методом плавления. Отсутствие расплавленного металла, в котором резко возрастает растворимость водорода, препятствует его проникновению в зону шва из соседних областей и образованию пор, что исключает дополнительное насыщение данной зоны газом.



а *б*

Рис. 1. Внешний вид швов на лицевой поверхности листов сплава 1163Т: а – аргонодуговая сварка; б – сварка трением с перемешиванием

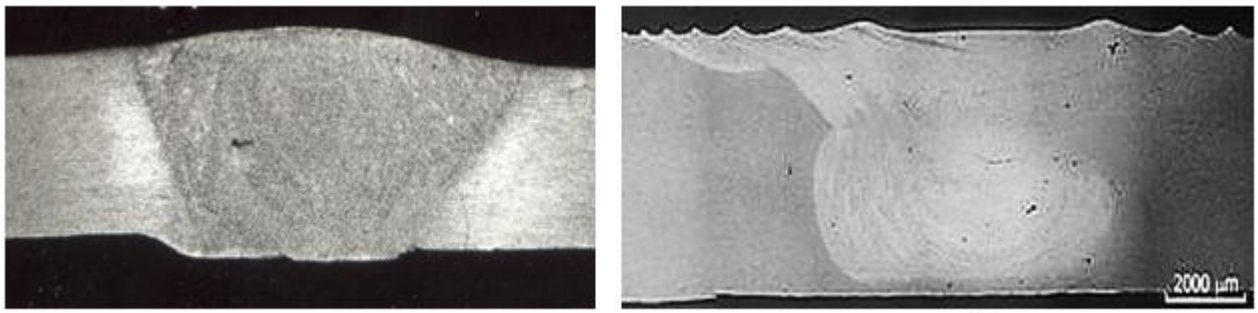


Рис. 2. Макроструктура сварных швов листов сплава 1163Т толщиной 2 мм, выполненных аргонодуговой сваркой (а) и сваркой трением с перемешиванием (б)

Деформирование и интенсивное перемешивание пластифицированного металла по всей толщине кромок во время сварки приводит к разрушению оксидных плёнок на их поверхности. Отсутствие расплавленного металла в зоне формирования неразъёмного соединения исключает возможность его окисления в ходе процесса сварки. В результате швы, полученные при СТП, не содержат макровключений оксидных пленок, характерных для сварки алюминиевых сплавов методом АрДС по разным причинам (рис. 3).

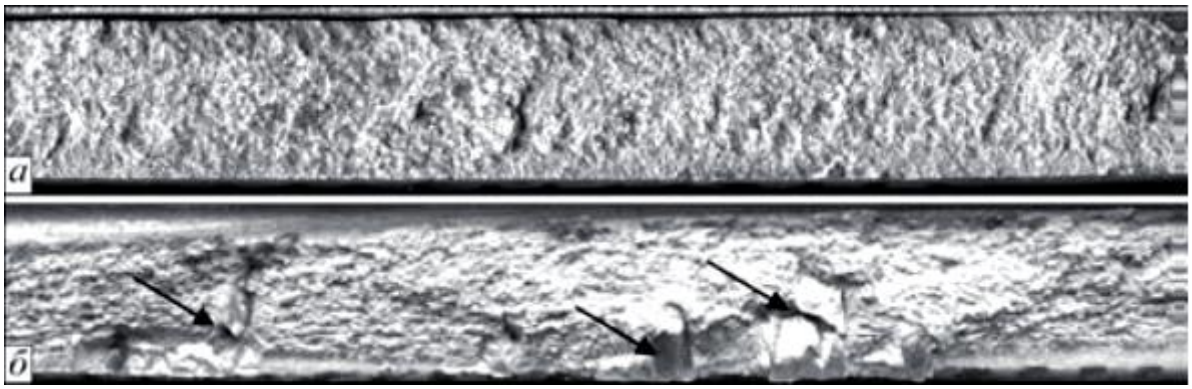
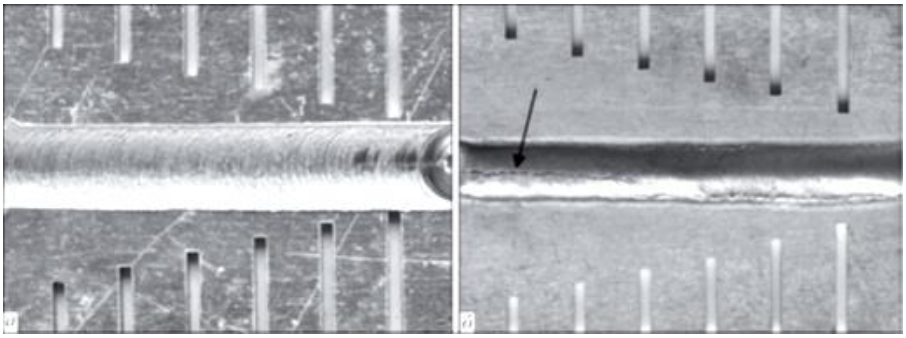


Рис. 3. Продольные изломы швов сплава 1163Т толщиной 2 мм, выполненных СТП (а) и ААрДС (б) с макровключениями оксидной плены (указаны стрелками)

Наиболее критичными дефектами для конструкций повышенной ответственности являются горячие трещины, возникающие при кристаллизации расплава в зонах скопления легкоплавких эвтектических включений. Исследования показали, что при ААрДС образцы Хоулдкрофта из сплава 1163 подвержены образованию горячих трещин в центральной зоне шва (рис. 4). В то же время при СТП формирование шва происходит в твердом состоянии, при этом плавление и кристаллизация металла не происходят, что полностью исключает появление подобных дефектов.



а *б*

Рис. 4. Образцы Хоулдкрофта из сплава Д16 толщиной 2 мм, полученные СТП (а) и ААрДС (б) с кристаллизационной трещиной (указана стрелкой)

Особенности формирования швов при СТП положительно влияют на степень ослабления металла в зоне неразъёмных соединений. Измерения твёрдости в зоне формирования соединения показали, что при сварке сплава 1163Т СТП твёрдость металла шва практически не отличается от твёрдости основного материала (рис. 5). В зоне термомеханического воздействия твёрдость постепенно уменьшается с отдалением от шва, достигая минимальных значений (HRB 97–98) на границе зоны термического влияния. В то же время при ААрДС с применением в качестве присадки полосы из основного материала 1163 минимальная твёрдость металла в центральной части шва составляет всего HRB 89–90, а в зоне сплавления шва с основным материалом – на уровне HRB 92–94.

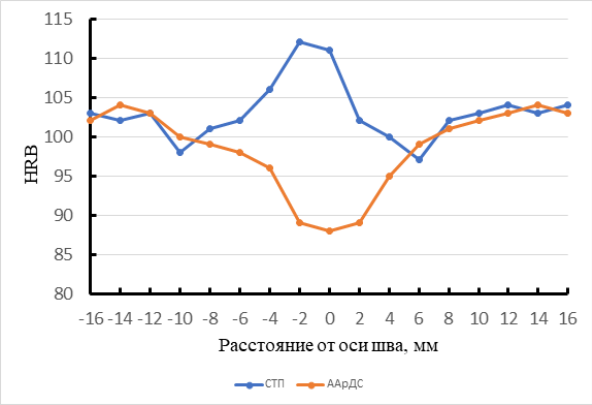


Рис. 5. Распределение твердости в сварных соединениях сплава 1163Т толщиной 2,0 мм, полученных СТП и ААрДС

Поэтому при одноосном статическом растяжении образцы сварных соединений, выполненные с использованием СТП, демонстрируют наибольшее (425 МПа) временное сопротивление и разрушаются вблизи границы перехода зоны термомеханического воздействия в зону термического влияния, где металл обладает минимальной твердостью. Наименьшее (295 МПа) временное сопротивление характерно для образцов с удаленными усилением и проплавами швов, выполненных методом ААрДС – разрушение происходит по шву, представляющему собой литой металл с наименьшей твердостью. Образцы с усилением шва имеют временное сопротивление около 330 МПа и разрушаются в зоне сплавления шва с основным металлом, где наблюдается максимальная концентрация напряжений.

Механические свойства сварных соединений сплавов Д16Т и 1163Т при статических испытаниях приведены в таблице 3.

Таблица 3

Механические свойства сварных соединений листов сплавов Д16Т и 1163Т

Вид сварки	Временное сопротивление сварного соединения $\sigma_в$, МПа	Коэффициент прочности сварного соединения *K*	Временное сопротивление металла шва σшВσВш, МПа	Угол изгиба α, град.
Сплав Д16Т				
ААрДС	330	0,68	295	56
СТП	425	0,88	442	118
Сплав 1163Т				
ААрДС	302	0,70	263	73
СТП	387	0,90	428	165

При циклических нагрузках в образцах сварных соединений, выполненных методом ААрДС, инициация усталостных трещин наблюдается в зоне максимального напряжения – на стыке шва с основным материалом. Отсутствие усиления шва у образцов, изготовленных по технологии СТП, препятствует образованию высокой концентрации напряжений. Тем не менее, на поверхности таких образцов присутствует незначительная геометрическая неоднородность у края зоны термомеханического воздействия, обусловленная погружением заплечика инструмента в металл. Именно в этой зоне и зарождаются усталостные трещины в сварных соединениях, выполненных методом СТП.

По итогам усталостных испытаний установлено, что предел ограниченной выносливости сварных соединений, выполненных методом СТП в твердой фазе, при базе $2 \cdot 10^6$ циклов нагружения составляет 120 МПа, что составляет 85% значений, характерных для основного металла (рис. 6).

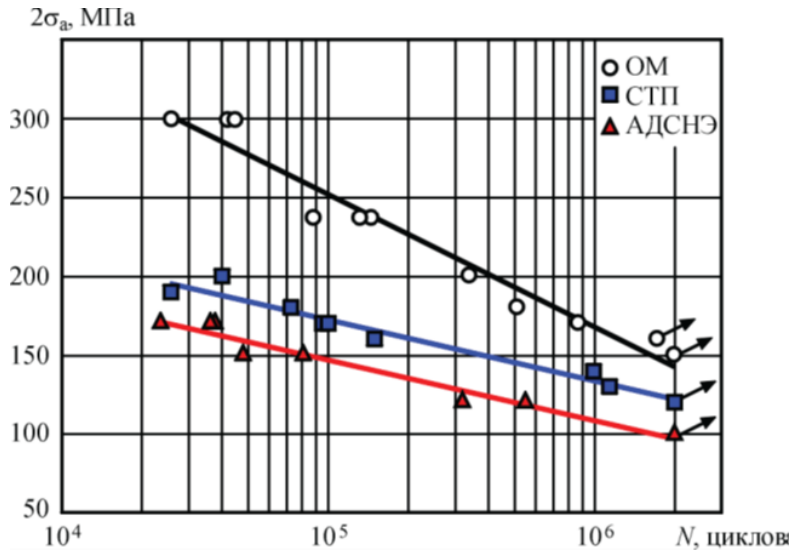


Рис. 6. Кривые усталости основного материала и сварных соединений алюминиевого сплава 1163Т, толщиной 2 мм при асимметрии цикла нагружения Rσ = 0,1 (ОМ – основной металл)

Характеристики сопротивления усталости находятся выше значений для соединений, выполненных ААрДС, во всей области долговечностей $10^5…2·10^6$ циклов перемен нагружения, а их ограниченный предел выносливости на базе $2·10^6$ циклов составляет 110 МПа, что на 15% ниже, чем для соединений, выполненных СТП.

К снижению показателей долговечности сварных соединений, выполненных ААрДС, главным образом, приводит снижение твердости в металле шва, высокая концентрация действующих напряжений, обусловленная геометрическими параметрами шва, и образование остаточных сварочных напряжений.

На основании результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Использование СТП позволяет создавать неразъёмные соединения с минимальной концентрацией напряжений в зоне перехода от шва к основному материалу, исключая появление дефектов в шве – пор, макровключений оксидной плёнки и трещин, обусловленных горячим деформированием.

2. Физико-механические характеристики соединений, полученных методом СТП, выше, чем у аналогичных соединений, выполненных по технологии ААрДС.

Список литературы

1. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. – 2002. – № 4. – с. 12–17.

2. Швечков Е. И., Захаров В. В., Ростова Т. Д. К вопросу о выборе марки алюминиевого сплава для обшивочных листов // Технология легких сплавов. – 2003. – № 1. – с. 17–21.

3. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; под общ. ред. акад. РАН И. Н. Фридляндера – К.: Коминтех, 2005. – 365 с.

4. Friction Stir Butt Welding: Int. Pat. Application № PCT/GB 92/02203; GB Pat. Application № 9125978.8. – Publ. 1991.

5. Pietras A., Zadroga L. Rozwój metody zdrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) i możliwosci jej zastosowania // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. – 2003. – № 5. – p. 148–154.

6. Defalco J. Friction Stir Welding VS. Fusion Welding // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 42–44.

7. Enomoto M. Friction Stir Welding: research and industrial applications // Welding International. – 2003. – № 5. – P. 341–345.

8. Sato Y. Relationship between Mechanical Properties and Microstructure in Friction Stir Welded Al alloys // Journal of the Japan Welding Society. – 2002. – № 8. – P. 33–36.

9. Shibayanagi T. Microstructural aspects in friction stir welding // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2007. – № 9. – P. 416–423.

10, Феофанов А.Н., Овчинников В.В., Резцов Р.Б., Смирнов С.В. Односторонняя сварка трением с перемешиванием толстых листов сплава Д16ЧАТ. // Сварочное производство. 2025. №2 (1071). С.19–27.

Панас П.А.
руководитель проектов
НТО «ИРЭ-Полюс»
Россия, Москва
panaspaul@gmail.com
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL–CU–MN

Аннотация. В статье рассматриваются особенности лазерной сварки стыковых соединений алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Mn (в частности, 1201 и 2219), широко применяемых в авиационной и ракетно-космической технике благодаря их высокой удельной прочности, технологичности и устойчивости к экстремальным условиям эксплуатации. Исследовано влияние режимов лазерной сварки, дополнительного легирования (в том числе скандием), а также последующей термической обработки на структуру, механические свойства и коррозионную стойкость сварных соединений. Экспериментально показано, что лазерная сварка обеспечивает формирование мелкозернистой структуры с высокой технологической прочностью и минимальными остаточными деформациями. Оптимизация химического состава (введение Ag, Zr, Sc) и режимов искусственного старения позволяет повысить прочностные и пластические характеристики, а также коррозионную стойкость сварных соединений. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности лазерной сварки для соединения листов из сплавов системы Al–Cu–Mn, а также о перспективности комплексного легирования сплава 1201 и термической

обработки для повышения надёжности сварных конструкций в ответственных узлах авиационной и космической техники.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, система легирования Al–Cu–Mn, листы, лазерная сварка, сварные соединения, механические свойства, термическая обработка.

Panas P.A.
Project Manager
NPO Polyus
Russia, Moscow
anna1-2016@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

FEATURES OF LASER WELDING OF BUTT JOINTS OF ALUMINUM ALLOYS OF THE Al–Cu–Mn SYSTEM

Abstract. The article discusses the features of laser welding of butt joints of aluminum alloys of the Al–Cu–Mn system (in particular, 1201 and 2219), which are widely used in aviation and rocket and space technology due to their high specific strength, manufacturability and resistance to extreme operating conditions. The effect of laser welding modes, additional alloying (including scandium), as well as subsequent heat treatment on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of welded joints is investigated. It has been experimentally shown that laser welding provides the formation of a fine-grained structure with high technological strength and minimal residual deformations. Optimization of the chemical composition (introduction of Ag, Zr, Sc) and artificial aging modes makes it possible to increase the strength and plastic characteristics, as well as the corrosion resistance of welded joints. The results obtained indicate the high efficiency of laser welding for joining sheets of alloys of the Al–Cu–Mn system, as well as the prospects of complex alloying of alloy 1201 and heat treatment to improve the reliability of welded structures in critical components of aviation and space technology.

Keywords: aluminum alloys, Al-Cu-Mn alloying system, sheets, laser welding, welded joints, mechanical properties, heat treatment.

Сегодня ключевыми сферами использования алюминиевых сплавов остаются авиация и ракетостроение. Именно высокие показатели удельной прочности, удобство обработки и экономическая доступность изначально стали решающими факторами при выборе материалов авиаконструкторами. Однако для надежной работы узлов в реальных космических условиях критически важна устойчивость материалов к агрессивным факторам космоса: экстремальному вакууму, резким температурным колебаниям и радиационному излучению. На данный момент именно деформируемые алюминиевые сплавы в наибольшей степени соответствуют этим строгим требованиям, что обуславливает их широкое и активное применение.

На протяжении многих лет в конструкциях изделий космической техники, где необходимо сочетание повышенных прочностных характеристик

при криогенных, комнатных и повышенных температурах успешно применяются полуфабрикаты из сплавов системы Al–Cu–Mn (1201, 2219) с дополнительными микродобавками. Эти сплавы имеют вполне удовлетворительную свариваемость и имеют достаточно высокий уровень механических свойств при температуре жидкого водорода. Указанные сплав имею склонность к повышению прочности при снижении температуры испытаний [1–4].

Основной упрочняющей фазой в сплавах этой системы является Al_2Cu. Повышение механических характеристик, улучшение свариваемости, жаропрочности и коррозионной стойкости достигается путем оптимизации химического состава, дополнительного легирования (Ag, Zr, Sc), а также выбором режимов деформирования и термической обработки [5–7]. Комплексное легирование серебром, цирконием и скандием способствует упрочнению сплава при искусственном старении. Введение серебра способствует повышению коррозионной стойкости.

Использование лазерной сварки сплавов марки 1201 (2219) способствует уменьшению количества пор и оксидных включений в шве за счёт интенсивного перемешивания расплавленного металла в зоне плавления – от переднего к заднему участку сварочной ванны. Ширина шва при этом уменьшается в 2–5 раз по сравнению с аналогичным показателем при аргонодуговой сварке, что обусловлено высокой концентрацией энергии лазерного излучения и снижением объёма расплава. Благодаря малому объёму металла в расплавленном состоянии и особой форме шва улучшаются условия кристаллизации, что повышает технологическую прочность, механические характеристики соединения и снижает уровень остаточных деформаций.

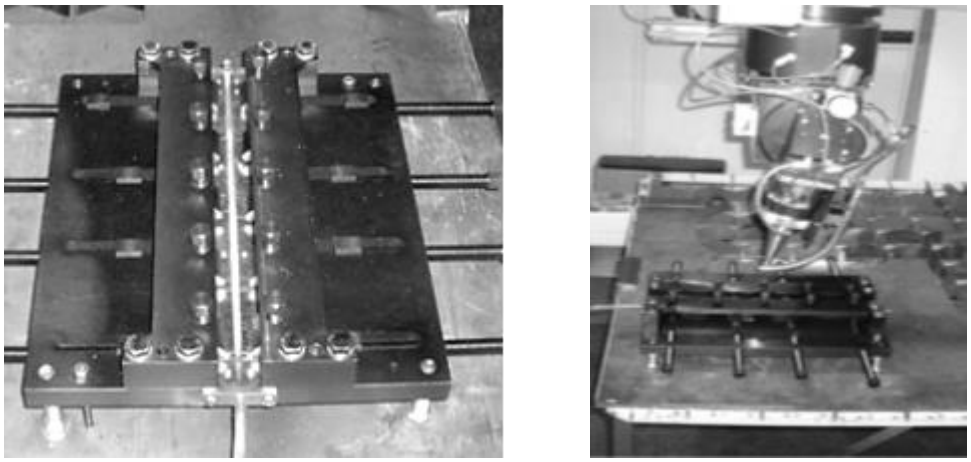
Объектом исследований явились листы толщиной 5,0 мм из алюминиевого сплава 1201 без легирования и с легированием скандием без технологической плакировки. Листовые заготовки перед сваркой подвергали фрезеровке по кромкам, чтобы обеспечить требуемую шероховатость поверхности ($Rz \leq$ 20 мкм). Перед сваркой поверхности обезжиривали, обрабатывали химическим способом и тщательно зачищали до блеска с использованием шабера.

Лазерную сварку (ЛС) листов сплава 1201 проводили с применением универсального комплекса на базе иттербиевого волоконного лазера ЛС-2 фирмы «ИРЭ-Полюс» с использованием присадочной проволоки марки Св1201 диаметром 1,0 мм со скальпированной поверхностью.

Для защиты металла с лицевой стороны шва и его корневой зоны применялся аргон. Подача газа к корню шва необходима не только для обеспечения защитной среды, но и для повышения поверхностного натяжения расплавленного металла, что препятствует образованию провисаний и подрезов. Оптимальный расход аргона для защиты лицевой поверхности шва – 10–15 л/мин, для корневой части – 5–8 л/мин.

Свариваемые пластины удерживались в специальной технологической оснастке, предназначенной для сварки плоских образцов с системой защиты

корневой зоны шва (рис. 1, а). На рис. 1, б изображён внешний вид сварочной оптической головки с коаксиальной подачей защитного газа и дополнительным козырьком.



а *б*

Рис. 1. Зажим свариваемых пластин в специальной технологической оснастке для сварки плоских образцов с системой защиты корневой части шва (а) и сварочная оптическая головка с коаксиальной подачей защитного газа и дополнительным козырьком (б)

Ключевыми параметрами лазерной сварки выступают: мощность лазерного излучения $W_л$, Вт; скорость выполнения сварки $V_{св}$, м/мин; положение фокальной плоскости относительно поверхности деталей ΔF (глубина погружения), мм; расход защитного газа P, л/мин. В ходе экспериментов применялась фокусирующая система с фокусным расстоянием F = 150 мм.

Уровень остаточных напряжений в сварных соединениях определяли методом рентгеновской съемки образцов на анализаторе остаточных напряжений в Cr $K\alpha$-излучении методом изонаклона (U = 30 кВ, I = 8 мА) в соответствии с ММ1.595-17-225–2004.

Зеренную структуру сварных соединений выявляли с помощью анодного оксидирования микрошлифов в 2%-ном растворе борофтороводородной кислоты на установке электролитической полировки с пропусканием постоянного электрического тока в течение 1,5–2 мин (U = 18–20 В).

Микротвёрдость по Виккерсу ($HV_{0,2}$) сварных соединений определяли на автоматизированном твердомере Emco Test DuraJet-10 в соответствии с требованиями ГОСТ 6996–66. Локальный химический состав образцов изучали методом количественного микрорентгеноспектрального анализа с применением прибора «Суперпроб-733» (JCMA-733, Jeol, Япония), оснащённого энергодисперсионным микроанализатором Inca Energy (размер области анализа – 1 мкм², глубина проникновения – 1 мкм).

Испытания на растяжение проводили на испытательной машине Zwick Roell Z100 в соответствии с ГОСТ 1497, на ударную вязкость – на образцах

с U-образным надрезом (KCU) – на маятниковом копре КМ-1, на малоцикловую усталость (МЦУ) – при напряжениях 157; 176 и 196 МПа, частоте нагружения 40 Гц и коэффициенте асимметрии R = 0,1 по методике ГОСТ 25.502. Испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) и расслаивающую коррозию (РСК) проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9.021 и ГОСТ 9.904 соответственно.

Фрактографический анализ изломов сварных соединений выполнялся на образцах, подвергнутых испытаниям на усталость, с использованием сканирующего электронного микроскопа в соответствии с требованиями стандарта ММ1.2 020–2002.

Для оценки влияния добавки скандия на механические свойства при растяжении при комнатной температуре были проведены исследования двух партий образцов сплава 1201 – со скандием и без него (табл. 1).

Таблица 1

Влияние легирования скандием на механические свойства листов сплава 1201

Сплав 1201-Т1	Временное сопротивление $\sigma_в$	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ	Остаточная деформация ε
	МПа		%	
Без скандия	473	375	12	2–3
	448	338	11	–
С легированием скандием	487	385	10	2–3
	468	357	11	–

Исследования механических свойств (табл. 1) показали, что наиболее высокий уровень свойств имеют листы из сплава, легированного скандием, которые подвергались правке растяжением со степенью деформации в пределах 2–3%.

Проведён анализ влияния различных температурных режимов на механические характеристики листов с целью определения оптимального режима искусственного старения, обеспечивающего наибольшую прочность листов (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства листов сплава 1201, легированного скандием, при различных режимах искусственного старения

Режим искусственного старения		Временное сопротивление $\sigma_в$	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ
Температура, °С	Продолжительность выдержки	МПа		%
160	длительная	455–475	365–395	9–12
180	длительная	425–435	330–335	8–10
190	короткая	415–420	320–330	9–10
190	длительная	405–410	300–310	8–11

Как следует из данных табл. 2, наилучшим уровнем механических свойств обладают листы после искусственного старения при температуре 160 °С. Для этого режима искусственного старения временное сопротивление и условный предел текучести выше на 25–30 МПа по сравнению с другими исследованными режимами.

Микроструктура листов сплава 1201-Т1 со скандием после искусственного старения мелкозернистая рекристаллизованная с размером зерна в интервале 17–35 мкм (рис. 2).

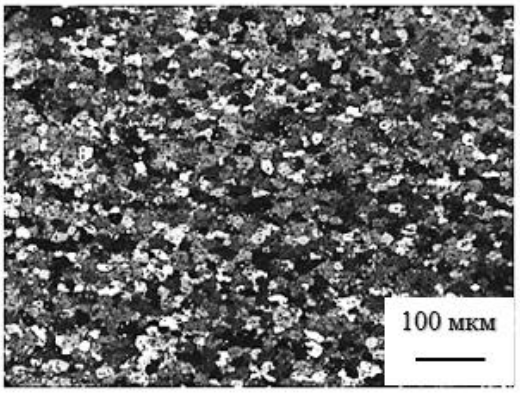


Рис. 2. Микроструктура листов из сплава 1201–Т1 со скандием

В табл. 3 приведены механические свойства листов сплава 1201-Т1 со скандием при различных температурах испытаний.

Таблица 3

Механические свойства листов из сплава 1201-Т1, легированного скандием, при различных температурах

Характеристика	Значение характеристики при температуре испытаний, °С					
	–196	–70	+20	+125	+150	+175
$\sigma_В$, МПа	518	482	463	427	392	370
$\sigma_{0,2}$, МП	435	400	395	370	352	335
δ,%	8	11	12	17	22	23
KCU, кДж/м^2	–	192	172	–	–	–

При отрицательных температурах прочностные свойства листов повышаются на 5–10%. При повышении температуры испытаний до 125–175 °С наблюдается постепенное снижение прочностных свойств.

Установлено, что листы сплава 1201-Т1 практически не чувствительны к наличию концентратора напряжений ($\sigma_{В.\ отв.}$ / $\sigma_В$ составляет –1).

Механические свойства после эксплуатационных нагревов в течение 100 и 1000 часов при температуре +125 °С ($\sigma_В$ = 465 МПа после выдержки в течение 100 часов и $\sigma_В$ = 457 МПа после 1000 часов) находятся практически на уровне исходных значений. Увеличение температуры нагрева до +150 °С

при выдержке влечет снижение показателей прочности (σ_B = 450 МПа после выдержки в течение 100 часов и σ_B = 425 МПа после 1000 часов). При выдержке при температуре +175 °С наблюдается дальнейшее снижение прочности сплава (σ_B = 420 МПа после выдержки в течение 100 часов и σ_B = 390 МПа после 1000 часов).

Изучение коррозионной стойкости листового материала из сплава 1201-Т1 с добавлением скандия дало следующие данные: глубина межкристаллитной коррозии (МКК) составила 0,15 мм, а оценка расслаивающей коррозии (РСК) – 3 балла. В ходе испытаний на склонность к коррозионному растрескиванию (КР) на стенде «Сигнал» образцы, расположенные перпендикулярно направлению прокатки, выдержали воздействие напряжения 270 МПа в течение более 45 суток без возникновения разрушений.

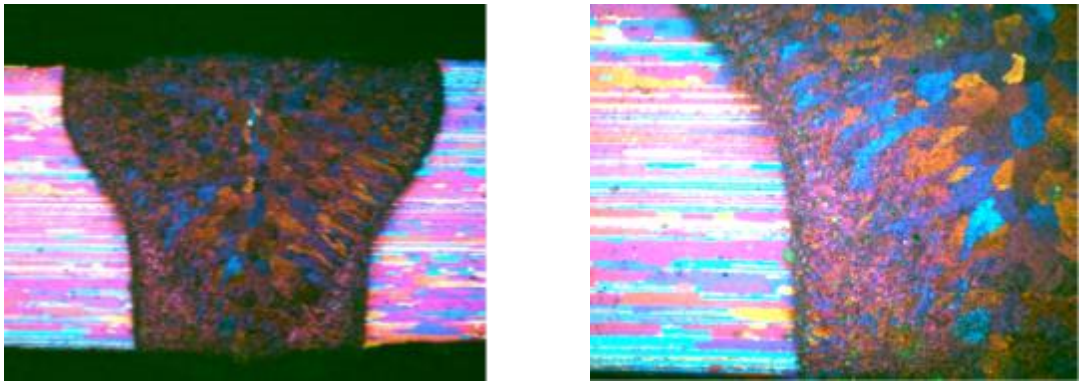
Измерения остаточных напряжений в сварных листовых соединениях из сплава 1201-Т1 проводили в поперечном направлении (поперек шва) в двух точках в зоне шва и околошовной зоне и в трех точках в основном металле (на расстоянии 5–7 мм от шва). Результаты измерений показали, что в сплаве 1201-Т1 в зоне шва напряжения сжимающие, в остальных точках измерения – растягивающие (табл. 4).

Таблица 4

Результаты измерения напряжения в сварных соединениях листов сплава 1201-Т1

Сплав	Остаточные напряжения, МПа, в точках						
	1	2	3	4	5	6	7
	шов		зона термического влияния		основной металл		
1201-Т4	–17	35	25	19	45	32	14

Исследование микроструктуры в области лазерного шва выявило, что в центре сварного соединения сплава 1201-Т1 формируется равноосная структура с размером зерна в пределах 35–55 мкм (рис. 3, *а*). В переходной зоне зафиксированы вытянутые в сторону отвода тепла зерна, а также зона мелкого рекристаллизованного зерна (рис. 3, *б*).



а *б*

Рис. 3. Микроструктура сварного соединения листов сплава 1201-Т1, выполненного лазерной сваркой (а – ×50; б – ×100)

Благодаря высокой скорости охлаждения наблюдается резкий переход от сварного шва к основному металлу. Изменений в структуре в зоне термического воздействия выявлено не было.

Величину зоны термического влияния определяли по распределению микротвердости ($HV_{0,2}$) в сварных соединениях. Высокопрочный сплав 1201-Т1 показал резкое снижение значений микротвердости в переходной зоне сварного соединения, по которой и происходит разрушение при определении механических свойств. Величина зоны термического влияния для сплава 1201-Т1 составляет 3–4 мм (рис. 4).

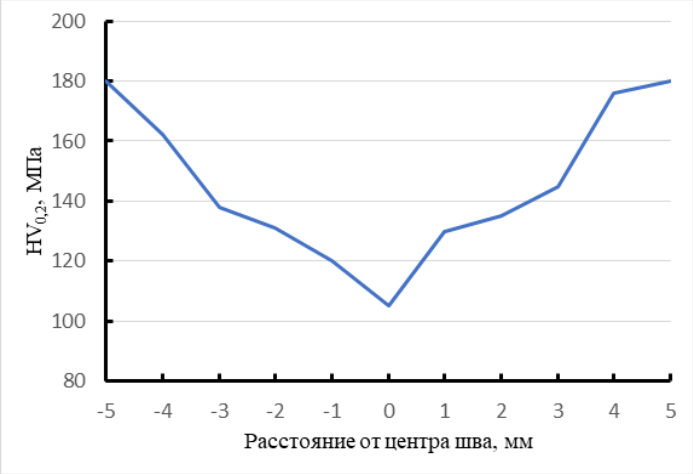


Рис. 4. Распределение микротвердости в сварных соединениях сплава 1201-Т1, выполненных лазерной сваркой

Исследование локального химического состава сварных соединений методом количественного МРСА выявило, что состав сварных швов сплава 1201-Т1 практически идентичен составу основного металла. В зоне шва и матрице основного материала обнаружены включения с высокой концентрацией меди, содержащие марганец, железо, никель и цинк, вероятно, представляющие собой $CuAl_2$.

На образцах, вырезанных из сварных соединений листов из сплава 1201-Т1, проведены испытания механических свойств при растяжении ($\sigma_в$), на статический изгиб (α), ударную вязкость с U-образным надрезом (*KCU*) и малоцикловую усталость (табл. 5).

Таблица 5

Свойства сварных соединений листов сплава 1201-Т1 (поперечное направление), выполненных лазерной сваркой

Сплав	$\sigma_в$, МПа	*KCU*, кДж/м²	α, град.	МЦУ, N, цикл при $\sigma_{нетто}$ max, МПа		
				157	179	197
1201-Т1	352	108	62	530	218	145

Фрактографические исследования изломов сварных образцов после испытаний на МЦУ показали, что характер разрушения во всех образцах многоочаговый, развивается с обеих сторон от дефектов поверхности, пор, несплавлений или рыхлот, а в зоне статического долома – разрушение внутризеренное с образованием мелкоямочного рельефа.

С целью получения сравнительных результатов была выполнена автоматическая аргонодуговая сварка и сварка трением с перемешиванием листов сплава 1201-Т1. В таблице 6 приведены значения механических свойств сварных соединений после различных вариантов термической обработки.

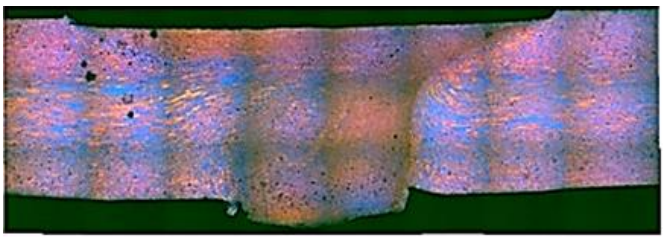
Таблица 6

Влияние термической обработки на механические свойства сварных соединений листов сплава 1201-Т1

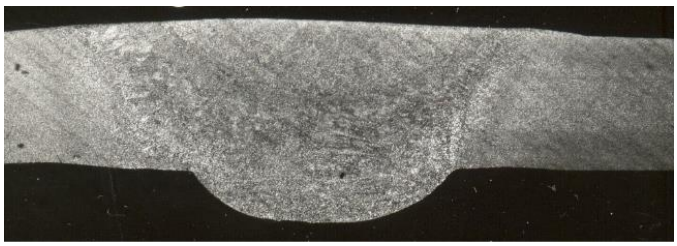
Вид сварки	Режим термообработки	Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	Угол изгиба α, град.	Ударная вязкость по шву *KCU*, кДж/м^2
Автоматическая аргонодуговая сварка (ААрДС)	Закалка + сварка + искусственное старение	365	58	255
	Закалка + искусственное старение + сварка	341	55	265
	Закалка + искусственное старение + сварка + искусственное старение	390	36	182
Лазерная сварка (ЛС)	Закалка + сварка + искусственное старение	350	44	238
	Закалка + искусственное старение + сварка	352	42	244
	Закалка + искусственное старение + сварка + искусственное старение	404	25	195
Сварка трением с перемешиванием (СТП)	Закалка + сварка + искусственное старение	345	82	135
	Закалка + искусственное старение + сварка	390	95	298
	Закалка + искусственное старение + сварка + искусственное старение	414	145	312

Результаты проведенных исследований показали, что применение термической обработки после сварки в виде искусственного старения позволяет повысить прочностные свойства сварных соединений при сохранении значений угла изгиба и ударной вязкости на достаточно высоком уровне.

На рис. 5 представлены макроструктуры соединений листов сплава 1201-Т1, выполненные аргонодуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием.



а



б

Рис. 5. Макроструктура сварных соединений листов сплава 1201-Т1, выполненных сваркой трением с перемешиванием (а) и автоматической аргонодуговой сваркой (б)

В табл. 7 приведены сравнительные значения механических свойств сплава 1201-Т1 без легирования и с легированием скандием, а также зарубежного сплава 2219.

Таблица 7

Сравнительные характеристик механических свойств сплавов системы Al–Cu–Mn

Сплав	Временное сопротивление $\sigma_в$	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ,%	Ударная вязкость по шву *KCU*, кДж/м^2	Модуль упругости *E*, ГПа
	МПа				
1201-Т1	412	314	11	120	70
1201-Т1 со скандием	460	360	9,5	175	72
2219-Т8	420	330	8	135	72

Таким образом, дополнительное легирование сплава 1201-Т1 серебром, скандием и цирконием имеют повышенные прочностные характеристики как основного металла, так и сварных соединений по сравнению с серийными аналогами (1201-Т1 и 2219). Правка растяжением после закалки способствует повышению прочностных характеристик, практически не снижая пластичности.

Сплав 1201-Т1, легированный скандием, удовлетворительно свариваются лазерной сваркой. Коэффициент прочности сварных соединений при испытаниях при 20 °С составляет 0,75–0,8 от прочности основного металла.

Список литературы

1. Клочков Г.Г., Плотников А.Д. Применение новых сплавов в ракетно-космической технике. // Цветные металлы. 2013. №9. С.54–57.

2. Сенаторова О.Г., Колобнев Н.И., Ткаченко Е.А. И.И. Фридляндер и его сплавы. // Цветные металлы. 2013. №9. С.28–30,

3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада. // Авиационные материалы и технологии. 2013. №11. С. 3–9.

4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.

5. Захаров В.В. Особенности кристаллизации алюминиевых сплавов, легированных скандием. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2011. №9. С.12–18.

6. Дитрих Д., Бренер Б. Применение технологий лазерной сварки при изготовлении интегральных конструкций обшивки фюзеляжа гражданских крупногабаритных самолетов //Авиационная промышленность. 2011. №1. С. 1–7.

7. Шиганов И.Н., Шахов С.В., Холопов А.А. Лазерная сварка алюминиевых сплавов //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 34–50,

Ткачук Е.В.

к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и детали машин»
Приазовский государственный технический университет
Россия, Мариуполь
ev13tk@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНОГО НАНОПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация. В статье проводится исследование новых процессов обработки деталей машин и процесс получения защитных покрытий с особыми функциональными свойствами (износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость) путем применения высокоэнергетических плазменных импульсов. Актуальность темы определяется необходимостью дальнейшего повышения ресурса деталей машин в условиях повышения интенсивности их эксплуатации в экстремальных условиях. Представлен новый подход в формировании импульсно-плазменного покрытия за счет интенсивного плазменного массопереноса материала электрода с соответствующей оптимизацией химического и фазово-структурного состояний последнего в соответствии с конкретными функциональными свойствами покрытия. В работе предлагается использовать в качестве сменного катода углерод-борсодержащие композиционные материалы или мультикомпонентные сплавы с высоким содержанием элементов IV-VI групп. Эти материалы вмещают высокое количество карбидных и карбоборидных фаз, а потому перспективны с учетом формирования высокоэффективных покрытий с повышенными функциональными свойствами. Благодаря химическому составу и физико-химическим свойствам указанные материалы смогут обеспечить получение импульсно-плазменных покрытий необходимой плотности и толщины при заданном уровне функциональных свойств без необходимости использования постплазменной термической обработки. Результатом исследования являются технологические рекомендации, которые обеспечат существенное повышение уровня служебных свойств деталей машин в экстремальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: нанопокрытие, износостойкость, жаростойкость, детали машин, импульсно-плазменная обработка, композиционные материалы, сплавы.

Tkachuk E.V.
Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Lifting and Transport Machines and Machine Parts
Priazovsky State Technical University
Russia, Mariupol
ev13tk@gmail.com

APPLICATION OF A PROTECTIVE NANOCOATING TO EXTEND THE SERVICE LIFE OF MACHINE COMPONENTS

Abstract. This article explores new processes for machining machine parts and the production of protective coatings with special functional properties (wear resistance, heat resistance, and corrosion resistance) using high-energy plasma pulses. The relevance of this topic is determined by the need to further increase the service life of machine parts under increasingly intensive operating conditions under extreme conditions. A new approach to forming a pulsed plasma coating is presented, using intense plasma mass transfer of the electrode material with corresponding optimization of the latter's chemical and phase-structural states in accordance with the specific functional properties of the coating. The paper proposes using carbon-boron-containing composite materials or multicomponent alloys with a high content of IV-VI group elements as replaceable cathodes. These materials contain a high content of carbide and carboboride phases and, therefore, are promising for the formation of highly effective coatings with enhanced functional properties. Thanks to their chemical composition and physicochemical properties, these materials can produce pulsed plasma coatings of the required density and thickness with a given level of functional properties without the need for post-plasma heat treatment. The research results in technological recommendations that will significantly improve the performance of machine parts under extreme operating conditions.

Keywords: nanocoating, wear resistance, heat resistance, machine parts, pulsed plasma treatment, composite materials, alloys

Импульсно-плазменная обработка является перспективным направлением инженерных решений поверхностных слоев, что обеспечивает комплексный прочностной эффект, повышающий эффективность металлоконструкций и деталей машин. Известные технологии импульсно-плазменной обработки сосредоточены на модификации поверхностного слоя деталей путём фазово-структурных преобразований и радиационно-стимулированной диффузии. При этом возникают тонкие слои, которые не превышают нескольких десятков микронов, что является недостатком для существенного повышения ресурса металлоконструкций и деталей машин. Защитные покрытия большей толщины (не менее 100 мкм) можно получить за счёт импульсно-плазменной обработки с использованием катодов, изготовленных из высоколегированных сплавов на основе инструментальных сталей, которые обеспечивают интенсивный плазменный перенос материала на поверхность, которая обрабатывается. Таким образом, для этой технологии характерна повышенная способность покрытия к трещинообразованию при кристаллизации и необходимость в постплазменной термической обработке

для распада твердых растворов и образования карбидных фаз, которые в большинстве случаев ухудшают механические способности в металлоконструкциях. Устранение этих недостатков возможно путём рационального подбора поэтапно-химического состава материала катодов и технологических параметров импульсно-плазменной обработки, что является актуальной задачей, которая требует своего решения.

Данное исследование основывается на работах отечественных и зарубежных ученых. Описанные в этих работах технологии базируются на различных принципах генерации плазменных импульсов и обеспечении нужного состава формируемых покрытий. В статье Espallargas [1] показана возможность применения импульсно-плазменной обработки для химико-термической обработки жаростойких сплавов. Фундаментальные исследования в сфере использования рассматриваемой технологии для поверхностного укрепления деталей машин проведены турецкими учеными, которые разработали метод, основанный на детонационной коммутации электрического тока продуктами взрыва [2], что позволяет эффективно повышать долговечность деталей из различных сплавов. В отличие от этих технологий, в работе [3] для модификации поверхности коррозионностойкой и конструкционной среднеуглеродистой сталей применены методы импульсно-плазменной обработки с плазменным разрядом в атмосфере воздуха. В указанных выше технологиях использованы плазмотроны с тугоплавким (вольфрамовым или молибденовым) электродом, а потому электрод практически не принимает участия в формировании покрытия, вследствие чего нанесение покрытия достаточной толщины требует достаточно долгого времени.

Более простая конструкция оборудования описана в работах [4–7], который впервые предложил применять электротермический аксиальный плазменный ускоритель для модифицирующего укрепления стальной поверхности. Плазменный разряд при этом формируется в атмосфере воздуха. Несмотря на указанные доработки, в работах других отечественных и зарубежных ученых остаются неизученными возможности дальнейшего развития технологии формирования карбидных и карбоборидных покрытий заданной толщины с высоким ресурсом долговечности.

Основные идеи работы заключаются в том, чтобы за счет рационального подбора фазово-химического состава катода обеспечить: высокую скорость наращивания покрытия, формирование плотных покрытий без микротрещин с высокой адгезией к основанию, покрытии без применения постплазменной термообработки. Для обеспечения высоких трибологических свойств покрытия применяются карбиды переходных металлов IV-VI групп (W, Ti, Nb, V), обладающие наиболее высокой микротвердостью и высокой температурой плавления. Еще более перспективным является использование карбоборидов этих же элементов, поскольку они имеют повышенную (на 10–20%) в отношении карбидов микротвердость. Катоды могут быть изготовлены методом порошковой металлургии или литья из мультилегиро-

ванных сплавов с высокой объемной долей карбоборидов. Гранулометрический состав укрепляющих фаз должен предусматривать сохранение основного объема карбидного включения в нерасплавленном состоянии при плазменном переносе; для его расчета необходимо разработать соответствующую математическую модель. За счет выбора материала матрицы необходимо обеспечить: высокую плотность покрытия (отсутствие микротрещин) и адгезию к основанию, повышение микротвердости участков деталей машин.

Целью работы является повышение функциональных свойств деталей машин и металлоконструкций в условиях интенсивного износа и действия коррозионно-активных сред путем образования импульсно-плазменных защитных покрытий. Достижение цели базируется на экспериментальном получении и теоретическом обобщении данных относительно формирования и свойств композиционных функциональных покрытий на основе карбидов и карбоборидов переходных металлов IV-VI групп, полученных путем применения высокоэнергетических плазменных импульсов.

В результате исследований предполагается получить новые результаты по:

1) целесообразности и перспектив использования электротермического плазменного ускорителя газодинамического действия с переменным катодом для получения в атмосфере воздуха плотных карбидных/карбоборидных импульсно-плазменных покрытий толщиной не менее 100 мкм без использования постплазменной термической обработки;

2) влияния химического состава, гранулометрических характеристик составляющих переменных катодов и режима работы ЭАПП на закономерности формирования импульсно-плазменных защитных покрытий;

3) механизм формирования композиционного строения и градиентных структур в покрытиях в зависимости от комбинирования разнородных катодов и режима работы плазменного ускорителя;

4) фазово-структурного состояния, физико-механических и функциональных свойств полученных защитных импульсно-плазменных композиционных покрытий;

5) оптимальных режимов ИПО с учетом необходимости получения заданного уровня функциональных свойств (износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к высокотемпературной коррозии).

В процессе выполнения работы будут разработаны:

1) аналитическая методика выбора химического состава сменных катодов для импульсно-плазменного нанесения защитных функциональных покрытий триботехнического назначения. Методика будет базироваться на моделировании термодинамических характеристик и физико-химических свойств карбидных/карбоборидных фаз и температурно-энергетических параметров плазменной струи;

2) проект технологической инструкции на проведение импульсно-плазменного нанесения кар-бедных и карбоборидных функциональных покрытий.

Ожидаемые результаты исследования будут представлять практический интерес для предприятий машиностроительной и горно-металлургической отраслей, где в большом количестве используются машины и оборудование, работающие в условиях интенсивного износа или действия агрессивных сред. Работа направлена на повышение долговечности деталей машин и металлоконструкций путём нанесения покрытий с повышенным уровнем функциональных свойств. В результате выполнения экспериментов будут впервые разработаны технологические предложения по импульсно-плазменному нанесению защитных покрытий значительной толщины (не менее 100 мкм) с высокой объемной долей высокотвердых фаз (карбидов и карбоборидов элементов IV-VI групп), которые будут характеризованы высоким уровнем достойности и износостойкости. Нанесение таких покрытий обеспечит повышение долговечности деталей в условиях износа и действия агрессивных сред не менее чем на 25% и инструмента – не менее чем на 15%. Это будет способствовать более эффективному использованию металлоконструкций, уменьшению затрат на замену изношенных деталей ремонту и простому оборудованию, что будет иметь экономический эффект и будет соответствовать в целом потребностям экономики страны.

Список литературы

1. Espallargas N. Dry wear and tribocorrosion mechanisms of pulse plasma nitrided Ni–Cr alloy / N. Espallargas, S. Mischler // Wear. – 2011. – vol. 270, – P. 464–471.

2. Ozbek Y.Y. Surface properties of M2 steel treated by pulse plasma technique / Y.Y. Ozbek, H. Akbulut, M. Durman // Vacuum. – 2015. – Vol. 122. – P. 90-95.

3. Zhukeshov A.M. Hardening of Structural Steel by Pulsed Plasma Treatment / A.M. Zhukeshov, A.T. Gabdullina, A.U. Amrenova, S.A. Ibraimova // Journal of nano- and electronic physics. – 2014. – Vol. 6. – No 3. – P. 03066-1 – 03066-2.

4. Kusumoto K., Shimizu K., Kiguchi S., Nakajo Y., Cheiliakh O., Iefremenko V., Chabak Y.G. Characteristics of erosive wear with Fe-V-Cr-C cast irons // Advanced Sustainable Foundry: 71st World Foundry Congress, Bilbao, 19–21 May 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/301788400_Characteristics_of_Erosive_wear_with_Fe-V-Cr-C_cast_irons?ev=prf_pub

5. Kusumoto K., Shimizu K., Hara H., Tanaka M., Cheikiakah O., Iefremenko V., Chabak Yu.G. Characteristics of erosive wear with multi component cast iron // Proceedings of 5th World Tribology Congress, Italy, Torino 9–15 September 2013. – Italy, Torino, 2013. URL:
https://www.researchgate.net/publication/275650268_Characteristics_of_Erosive_Wear_with_Multi_Component_Cast_Iron

6. Efremenko B., Belik A., Chabak Yu., Halfa H. Simulation of structure formation in the Fe–C–Cr–Ni–Si surfacing materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – № 2. – С.33–38. (Scopus) http://journals.uran.ua/eejet/article/view/124129

7. Шанин Сергей Александрович, Князева Анна Георгиевна, Поболь Игорь Леонидович, Дениженко Анатолий Григорьевич Численное и экспериментальное исследование влияния технологических параметров на фазовый и химический состав карбидного покрытия, растущего в импульсной электродуговой плазме // Химическая физика и мезоскопия. 2012. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-i-eksperimentalnoe-issledovanie-vliyaniya-tehnologicheskih-parametrov-na-fazovyy-i-himicheskiy-sostav-karbidnogo-pokrytiya (дата обращения: 07.05.2026).

Соловьев И.С.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
solovev.i.s@yandex.ru
Бабуев М.А.
старший преподаватель кафедры «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
z20130@yandex.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ПЛАЗМУ РАЗРЯДА

Аннотация. В статье исследуются особенности магнетронного распыления с дополнительным ультразвуковым (УЗ) воздействием на плазму разряда. Показано, что введение УЗ-колебаний в зону магнетронного разряда позволяет существенно повысить плотность и равномерность распределения заряженных частиц, что способствует более эффективному осаждению покрытий и управлению их структурой. Экспериментально установлено, что при определённых частотах УЗ-колебаний (оптимум – около 600 кГц) достигается максимальная ширина зоны эрозии на мишени и наилучшая равномерность толщины покрытия на подложке из титанового сплава ВТ6. Отмечено, что ультразвуковое воздействие позволяет размыть кольцевую зону эрозии и повысить однородность покрытия. Подчёркивается необходимость дальнейших исследований для оптимизации параметров УЗ-воздействия в зависимости от технологических задач.

Ключевые слова: магнетронное распыление, ультразвуковое воздействие, плазма разряда, равномерность покрытия, эрозия мишени, тонкие плёнки, модификация поверхности, вакуумные технологии.

Soloviev I.S.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
solovev.i.s@yandex.ru
Babuev M.A.
Lecturer of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
z20130@yandex.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

FEATURES OF MAGNETRON SPUTTERING WITH ULTRASONIC EXPOSURE TO PLASMA DISCHARGE

Abstract. The article examines the features of magnetron sputtering with an additional ultrasonic (US) effect on the plasma of the discharge. It is shown that the introduction of ultrasonic oscillations into the magnetron discharge zone makes it possible to significantly increase the density and uniformity of the distribution of charged particles, which contributes to more efficient deposition of coatings and control of their structure. It has been experimentally established that at certain frequencies of ultrasonic oscillations (optimum – about 600 kHz), the maximum width of the erosion zone on the target and the best uniformity of the coating thickness on the substrate made of titanium alloy VT6 are achieved. It is noted that ultrasonic exposure makes it possible to blur the annular erosion zone and increase the uniformity of the coating. The need for further research to optimize the parameters of ultrasound exposure depending on technological tasks is emphasized.

Keywords: magnetron sputtering, ultrasonic exposure, plasma discharge, uniformity of coating, target erosion, thin films, surface modification, vacuum technologies.

Магнетронный разряд широко применяется для нанесения тонких плёнок, модификации поверхности и других технологических процессов благодаря высокой плотности плазмы и эффективности ионизации рабочего газа. Введение ультразвуковых (УЗ) колебаний в зону разряда представляет собой перспективный способ дополнительного управления параметрами плазмы, что позволяет повысить качество и функциональные свойства формируемых покрытий [1–3].

При наложении УЗ-колебаний в газовой среде, заполняющей разрядную камеру, формируются продольные и поперечные акустические волны. В плазме эти волны взаимодействуют с заряженными и нейтральными частицами, вызывая их дополнительное движение и перераспределение плотности.

Введение ультразвуковых колебаний в зону магнетронного разряда оказывает комплексное влияние на параметры плазмы: увеличивает плотность и равномерность распределения заряженных частиц, способствует более эффективному осаждению покрытий и позволяет управлять их структурой. Это открывает новые возможности для совершенствования технологий вакуумного напыления и модификации поверхности материалов. При этом возникает задача проведения дальнейших исследований по оптимизации параметров УЗ-воздействия для конкретных технологических задач.

На рисунке 1 показана экспериментальная установка для магнетронного напыления, которая дополнительно укомплектована источником ультразвуковых колебаний. Источник ультразвуковых установлен на специальной штанге, которая изолирована от корпуса вакуумной камеры специальными пробками–демпферами. При этом варианте УЗК-колебания не передаются на корпус камеры.



а *б*

Рис. 1. Расположение УЗК-источника на штанге (а) и размещение магнетрона (б) относительно источника УЗК

Расположение УЗК-источника на штанге позволяет воздействовать на различные области плазмы магнетронного разряда: вблизи распыляемой мишени, в средней части между мишенью и подложкой и вблизи подложки.

На рисунке 2 показан источник УЗК колебаний и цифровой индикатор частоты колебаний. Данный источник УЗК-колебаний позволяет воздействовать на плазму магнетронного распыления с частотой в диапазоне 100–1000 кГц.

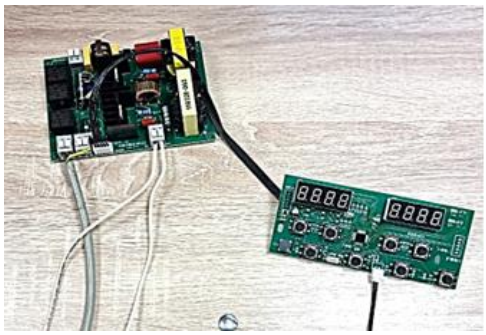


Рис. 2. Источник УЗК-колебаний с цифровым индикатором частоты колебаний

С УЗК-колебаниями проводили эксперименты по распылению молибденовой и медной дисковой мишени с различным расположением уровня источника колебаний относительно расстояния между мишенью и подложкой из титанового сплава ВТ6. При этом регистрировали характер распыления мишени и равномерность покрытия на поверхности подложки.

Для исследования влияния УЗК-колебаний на процесс распыления дисковой мишени была выбрана мишень из меди М1диаметром 38 мм и толщиной 5 мм. Распыление осуществляй в аргоне и в азоте при следующих параметрах процесса: температура подложки из титанового сплава ВТ6 составляла 100 °С; давление 2×10^{-2} мм. рт. ст.; мощность 120–130 Вт; время нанесения покрытия 5 минут; напряжение процесса 450 В.

В процессе экспериментов изменяли частоту УЗК-колебаний от 0 до 1000 кГц. Амплитуда при всех значениях частоты колебаний поддерживалась постоянной. Распыление производилось в атмосфере аргона.

При проведении экспериментов основное внимание уделяли изменению внешнего вида медной мишени в зависимости от частоты УЗК-колебаний. В качестве параметра эффективности влияния УЗК-колебаний бала принята ширина зоны эрозии на мишени после распыления в течение 5 минут.

Параллельно с помощью электронного микроскопа определяли химический состав покрытия на подложке из титанового сплава ВТ6 и распределение его толщины по поверхности напыленной подложки.

Влияние частоты УЗК-колебаний на ширину зоны эрозии поверхности дисковой медной мишени приведено на рисунке 3.

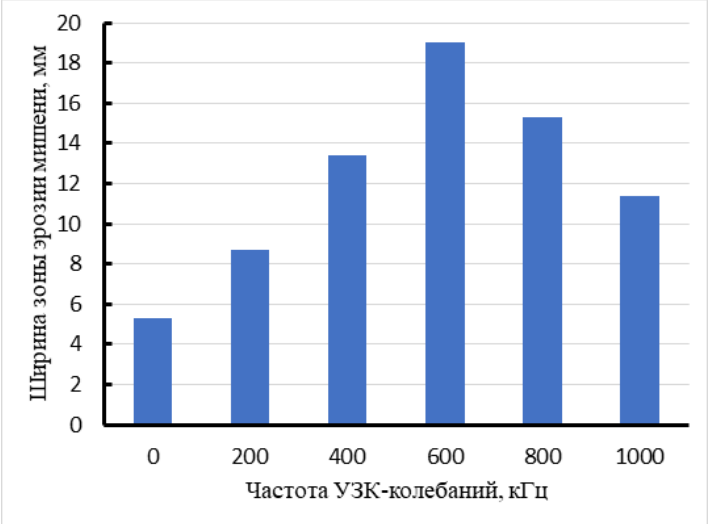


Рис. 3. Влияние частоты УЗК-колебаний на ширину эрозии медной дисковой мишени при распылении в аргоне

Анализируя представленные значения (рисунок 3), можно отметить, что при увеличении частоты УЗК-колебаний от 0 до 600 кГц наблюдается устойчивый рост ширины полосы эрозии с 5,3 до 19,0 мм. Однако при дальнейшем увеличении частоты УЗК-колебаний ширина полосы эрозии на поверхности мишени начинает снижаться, достигая 15,3 и 11,4 мм при частотах 800 и 1000 кГц соответственно. Подобная форма зависимости типична для многих физических и технических процессов, где существует оптимальное значение управляющего параметра.

Таким образом, представленный рисунок иллюстрирует нелинейную зависимость между частотой УЗК-колебаний и шириной полосы эрозии на поверхности мишени, характеризующуюся наличием максимума и последующим снижением значений при росте частоты УЗК-колебаний.

На рисунке 4 представлен внешний вид дисковой медной мишени после распыления в течении 5 минут при различной частоте УЗК-колебаний.

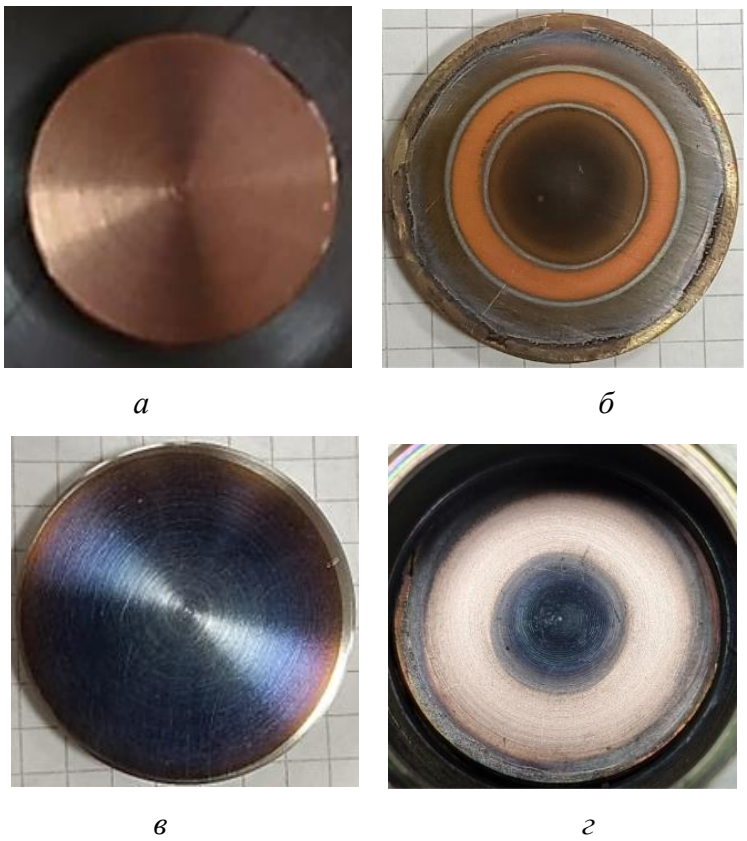


Рис. 4. Внешний вид медной дисковой мишени до распыления (а), после 5 минут распыления с частотой УЗК-колебаний 200 кГц (б), 600 кГц (в) и 1000 кГц (г)

Из рисунка 4, *б* отчетливо видно, что при распылении медной дисковой мишени без УЗК-колебаний, а также при использовании частот колебаний до 200 кГц наблюдается отчетливая кольцевая зона эрозии мишени.

Контроль толщины покрытия по поверхности подложки осуществлялся путем «притирания» сферических лунок с заглублением с подложку мало изнашиваемого контртела сферической формы с участием абразива. Результаты полученных измерений толщины покрытия в различных участках поверхности подложки представлены на рисунке 5 и в таблице.

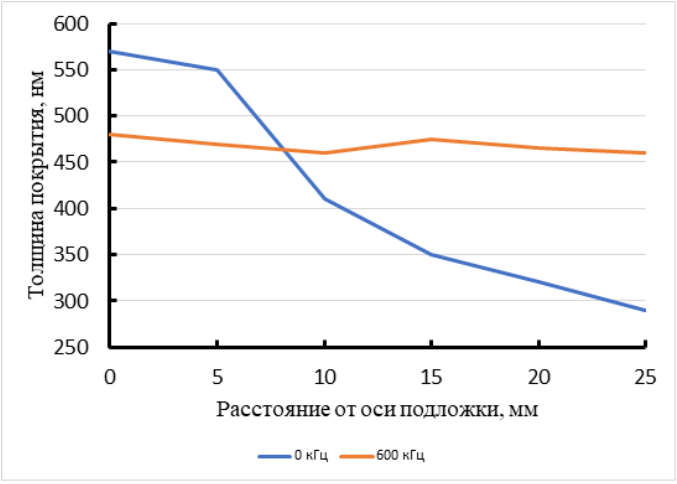


Рис. 5. Распределение толщины медного покрытия при использовании для распыления УЗК-колебаний с частотой 0 и 600 кГц

Таблица

Влияние частоты УЗК-колебаний на равномерность медного покрытия на поверхности подложки из титанового сплава ВТ6

Частота ультразвуковых колебаний, кГц	Расстояние от мишени до источника ультразвуковых колебаний, мм	Расстояние от центра подложки, мм						
		0	5	10	15	20	25	30
		Толщина покрытия, нм						
0	35	570	550	410	350	320	280	260
100	35	560	545	415	365	340	300	295
200	35	555	518	438	414	373	340	320
300	35	530	520	411	403	395	388	360
400	35	513	502	433	427	404	407	385
500	35	495	473	468	444	442	435	430
600	35	475	458	440	444	440	450	445
700	35	470	455	430	421	417	420	430
800	35	534	509	396	327	280	210	205
900	35	560	537	421	395	363	318	260

Измерения толщины покрытия на поверхности дисковой подложки из титанового сплава ВТ6 (рисунок 5) показали, что при распылении без УЗК-колебаний, в центральной части подложки толщина покрытия больше, чем на ее периферийных участках. При УЗК-колебаниях с частотой 600 кГц наблюдается формирование равномерного медного покрытия с толщиной в диапазоне 430–470 нм по всей поверхности подложки.

При использовании УЗК-колебаний появляется еще один параметр – это расстояние от мишени до источника колебаний. Варьированием этим параметром можно добиться дополнительного воздействия на плазму магнетронного разряда и тем самым управлять площадью дорожки эрозии на поверхности мишени и равномерностью покрытия на поверхности подложки.

На рисунке 6 представлено ПЭМ изображение структуры медного покрытия, нанесенного на титановый сплав ВТ6 при распылении с использованием ультразвука.

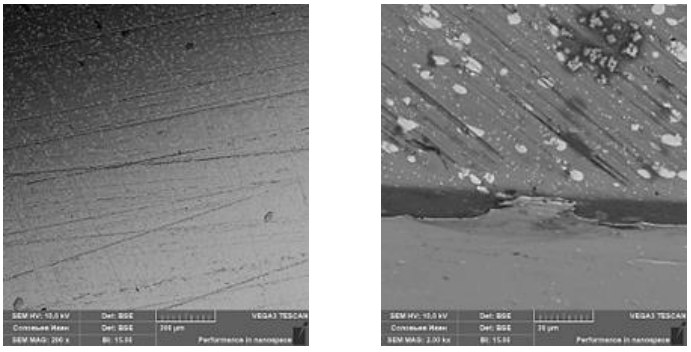


Рис. 6. Структура ПЭМ медного покрытия на поверхности подложки из титанового сплава ВТ6, полученного при УЗК-воздействии с частотой 600 кГц при различном увеличении

Таким образом, ультразвуковые колебания позволяют решить важную задачу по повышению равномерности распыления дисковой мишени и обеспечить размытие кольца эрозии. С другой стороны, применение ультразвуковых колебаний в рациональном диапазоне частот способствует выравниванию толщины покрытия на поверхности подложки.

Список литературы

1. Сиделёв Д. В. Осаждение покрытий из хрома и никеля с помощью магнетронного диода с «горячей» мишенью: дис. канд. тех. наук: 01.04.07. – Томск, 2018. – 218 с.

2. Anders A. A review comparing cathodic arcs and high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 257. – P. 308–325.

3. Thornton J.A. The microstructure of sputter-deposited coatings // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 1986. – Vol. 4. – No. 6. – P. 3059–3065.

Володин К.Е.
директор по продажам
ООО «ИТЦ «ЛазерТех»
Россия, Москва
k.volodin@itclt.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РУЧНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности формирования сварных соединений алюминиевых сплавов при ручной лазерной сварке. Проанализированы технические возможности портативного аппарата LightWELD 1500 с функцией колебаний луча. Экспериментально исследованы соединения сплавов АМг6М и 1565чМ толщиной 3 мм в различных режимах, с присадочной проволокой и без неё. Проведена сравнительная оценка методов подготовки кромок, выявлены оптимальные параметры процесса: частота колебаний 200–300 Гц, амплитуда 1,5 мм. Контроль качества швов осуществлялся визуальным и рентгенографическим методами. Показано, что лазерная очистка по эффективности сопоставима с химическим травлением. Подтверждена перспективность ручной лазерной сварки для производства и ремонта конструкций из алюминиевых сплавов при правильном выборе технологических параметров.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; ручная лазерная сварка; колебания лазерного луча; присадочная проволока; подготовка кромок; пористость сварного шва; рентгенографический контроль.

Volodin K.E.
Sales Director
ETC LaserTech LLC

Russia, Moscow
anna1-2016@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

FEATURES OF THE FORMATION OF WELDED JOINTS OF ALUMINUM ALLOYS DURING MANUAL LASER WELDING

Abstract. The article discusses the features of the formation of welded joints of aluminum alloys during manual laser welding. The technical capabilities of the portable device LightWELD 1500 with the function of beam oscillations are analyzed. Compounds of alloys AMg6M and 1565chM with a thickness of 3 mm in various modes, with and without filler wire, were experimentally investigated. A comparative assessment of the methods of edge preparation was carried out, the optimal parameters of the process were revealed: oscillation frequency of 200–300 Hz, amplitude of 1.5 mm. It has been shown that laser cleaning is comparable in efficiency to chemical etching. The prospects of manual laser welding for the production and repair of structures made of aluminum alloys with the correct choice of technological parameters have been confirmed.

Keywords: aluminum alloys; manual laser welding; vibrations of the laser beam; filler wire; edge preparation; porosity of the weld; X-ray control.

За последнее время лазеры стали повсеместно использоваться в производственной сфере, в частности, благодаря развитию способов лазерной сварки, позволяющих соединять материалы различной толщины. Ниже приведены некоторые из таких методов [1, 2]:

- Лазерная сварка в среде защитного газа (базовая технология);
- Лазерная сварка с колебаниями лазерного луча;
- Лазерная сварка с холодной/горячей подачей присадочной проволоки;
- Гибридная и комбинированная лазерно-дуговая сварка;
- Лазерная сварка в вакууме (общем или местном) и другие.

Благодаря способности концентрировать лазерный луч в пятно диаметром от 30 до 500 мкм, достигается плотность мощности в пределах 10^6–10^9 Вт/см² [3], что и обуславливает многообразие технологий лазерной сварки. Гибкое управление энергетическими параметрами позволяет варьировать размеры расплавленной ванны и формировать швы различной конфигурации: от узких и глубоких «кинжальных» до широких с незначительной глубиной проплавления. Скорость процесса при этом может составлять от 0,3 до 30 м/мин.

Ввиду высокой скорости протекания физических процессов, лазерная сварка преимущественно осуществляется посредством автоматизированных систем перемещения оптической головки, оснащенных числовым программным управлением (ЧПУ), таких как консольные или портальные станки, а также роботизированные комплексы [4]. Подобные установки

дают возможность в серийном режиме, следуя заданной программе, обрабатывать изделия различных габаритов – от малых до крупногабаритных, имеющих длинные сварные швы. Они гарантируют точное позиционирование сфокусированного лазерного луча на стыке и его перемещение с заданной скоростью вдоль свариваемых кромок.

Если речь идет о единичном или мелкосерийном производстве, а также при обработке сложных трехмерных деталей, вложения в дорогую автоматизацию часто нецелесообразны. В подобных случаях оптимальным решением становится недавно появившаяся на рынке ручная лазерная сварка.

Недавно применение ручной лазерной сварки сдерживалось несколькими обстоятельствами:

1. Нормативными документами СН 5804-91 и СанПиН 2.2.4.3359-2016, которые классифицируют ручные установки как оборудование 4-го класса опасности. Это запрещает нахождение людей в зоне действия луча и обязывает использовать дистанционное управление [5].

2. Технологическими барьерами: конструкция оптических модулей не предусматривала эксплуатации в ручном режиме.

3. Трудностями с управлением ключевыми параметрами процесса: скоростью сварки, точностью наведения на шов и углом наклона рабочего инструмента.

В ответ на растущий спрос рынка на ручные лазерные технологии была инициировала исследовательская работа, направленная на оценку влияния лазерного излучения на организм человека в процессе выполнения ручной лазерной сварки.

Опираясь на подтвержденную безопасность ручного лазерного сварочного процесса для персонала, в 2023 году НТО «ИРЭ-Полюс» представила инновационное оборудование – портативный аппарат LightWELD 1500 (рис. 1) [6]. Устройство отличается компактностью и мобильностью, а также оснащено сверхлегкой эргономичной оптической насадкой в форме пистолета, что существенно облегчает труд сварщика.



Рис. 1. Внешний вид аппарата LightWELD 1500

Технические характеристики аппарата LightWELD 1500 представлены в таблице 1.

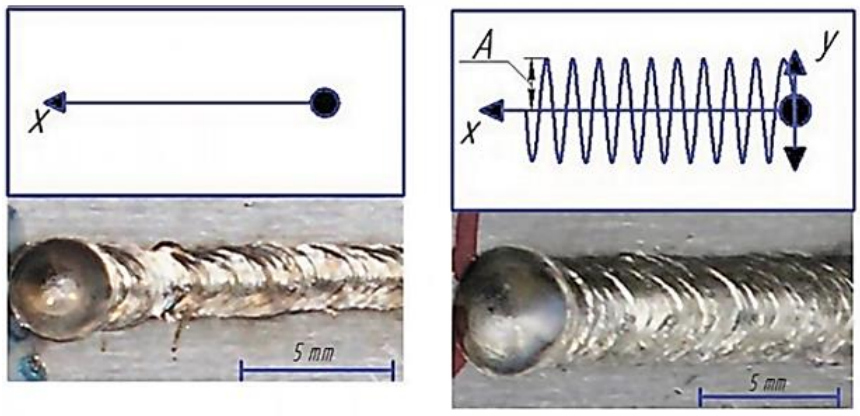
Таблица 1

Технические характеристики аппарата LightWELD 1500

Наименование параметра	Значение параметра
Тип лазера	Непрерывный иттербиевый волоконный лазер с длиной волны 1070 нм
Выходная мощность, Вт	1500
Режим пиковой мощности, Вт	2500
Охлаждение	воздушное
Фокусное расстояние коллимирующей линзы, мм	40
Фокусное расстояние фокусирующей линзы, мм	120
Диаметр активного пятна, мкм	150
Амплитуда качания луча, мм	до 5
Технологический газ	Аргон, азот, аргон + CO_2 Давление 620 КПа
Требования к питающей электрической сети	220 В, 50/60 Гц, ток не менее 20 А
Габариты базового блока (ШхГхВ), мм	316x641x534
Вес базового блока, кг	53

Был разработан сварочный пистолет, в который была встроена функция колебания лазерного луча в поперечном направлении относительно направления сварки. Диапазон регулировки частоты колебаний составляет от 0 до 300 Гц, а амплитуды – от 0 до 5 мм.

На рисунке 2 представлена диаграмма используемых колебаний и итоговый результат сварочного процесса.



а *б*

Рис. 2. Схема сварки с применением воблера:
а – сварка без колебаний; б – сварка с колебаниями лазерного луча

Реализация данной функции обеспечивает мониторинг процесса сварки и гарантирует соблюдение необходимой ширины шва [7]. Использование колебаний сфокусированного лазерного луча компенсирует неточности движений руки сварщика-оператора.

Задача настоящего исследования заключается в анализе технических характеристик и результативности процесса ручной лазерной сварки при соединении конструкций с тонкими стенками, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Для отработки методики ручной лазерной сварки проводились эксперименты с применением оборудования LightWELD 1500. В качестве материала использовались алюминиевые сплавы марок АМг6М и 1565чМ, которые широко востребованы в сварных конструкциях. Толщина образцов составляла 3 мм. В ходе испытаний соединялись плоские заготовки стыковым швом.

Сварку стыковых соединений исследуемых сплавов осуществляли как с присадочной проволокой, так и без нее.

Для процесса сварки с использованием присадочного материала применялась алюминиевая проволока марки СвАМг63 диаметром 1 мм. Скорость её подачи изменялась в широких пределах – от 0,5 до 1,5 м/мин, что дало возможность изучить влияние данной характеристики на итоговое качество стыка. Использование присадки при лазерной сварке обладает рядом достоинств, среди которых – расширение поперечного сечения шва и способность компенсировать зазоры между соединяемыми заготовками.

Подготовка торцов деталей выступает ключевым фактором, определяющим надежность сварных соединений при сварке алюминиевых материалов. В ходе работы были изучены и испытаны на практике четыре способа обработки кромок: механическое фрезерование, лазерное раскрой, химическое травление и лазерная очистка. Фрезерование гарантирует высокую точность геометрии и чистоту поверхности. Лазерная резка обеспечивает прецизионный рез с минимальным термическим воздействием на прилегающие зоны. Химическое травление эффективно устраняет оксидный слой и загрязнения. Лазерная очистка представляет собой экологичную инновацию, удаляющую примеси без применения реагентов. Все перечисленные технологии обладают собственными сильными и слабыми сторонами, что напрямую сказывается на итоговом качестве шва. Сравнительная оценка позволила выявить наиболее рациональный метод подготовки для ручной лазерной сварки исследуемых алюминиевых сплавов, обеспечивающий высокие эксплуатационные характеристики соединений.

С целью предотвращения окисления расплавленного металла в сварочной ванне применялся аргон высшей категории чистоты. Система газовой защиты функционировала двусторонне: газ подавался как через сопло сварочного пистолета на лицевую сторону шва, так и через специализированное подкладное устройство с обратной стороны (со стороны корня), что гарантировало полную изоляцию зоны сварки от окружающей среды.

Подготовка включала сборку пластин с последующей их фиксацией прихватками, при этом ключевым требованием было сведение к минимуму зазора между соединяемыми кромками заготовок. Данный параметр находился под строгим контролем и не должен был превышать 0,1 мм, поскольку

соблюдение этого допуска является критически важным для достижения высокого качества сварного шва.

Эксперименты на аппарате LightWELD 1500 проводились в ручном режиме, что давало возможность оператору самостоятельно задавать ключевые параметры процесса сварки. К ним относились мощность лазерного излучения, а также частота и амплитуда колебаний луча. Диапазоны значений данных параметров для различных режимов сварки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры режима лазерной сварки исследуемых алюминиевых сплавов толщиной 3 мм

Номер	Способ сварки	Амплитуда, мм	Частота, Гц				
			25	50	100	200	300
1	Без присадочной проволоки	0	1000 Вт				
2		0,5	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт
3		1,0	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт
4		1,5	1000 Вт	1000 Вт	1000 Вт	1100 Вт	1200 Вт
5		2,0	1000 Вт	1200 Вт	1300 Вт	1200 Вт	1300 Вт
6	С присадочной проволокой	0	1300 Вт				
7		0,5	1300 Вт	–	1300 Вт	–	1300 Вт
8		1,0	1300 Вт	–	1300 Вт	–	1300 Вт
9		1,5	1300 Вт	–	1300 Вт	–	1300 Вт
10		2,0	1300 Вт	–	1300 Вт	–	1300 Вт

В процессе отработки технологии сварки осуществлялась всесторонняя оценка качества стыков, которая включала два ключевых этапа контроля. Первый этап представлял собой визуальный и измерительный контроль (ВИК), направленный на проверку формы поверхности и корня шва в соответствии с нормативами ГОСТ Р ИСО 17637-2014. Второй этап заключался в радиографическом исследовании, позволяющем определить, как параметры сварочного режима влияют на возникновение внутренних дефектов, таких как пористость. Для этих целей применялась современная рентгенотелевизионная система «Колан 4», отличающаяся высокой чувствительностью и разрешающей способностью, что обеспечивало точное выявление объемных несплошностей в сварных соединениях.

Диапазон варьирования скоростей сварки без присадочной проволоки для листов толщиной 3 мм составил от 0,3 до 0,5 м/мин.

Мощность лазерного излучения для каждого режима выбиралась в зависимости от параметров колебаний лазерного луча (частоты и амплитуды) согласно данным, представленным в таблице 2.

Для достижения нужного положения фокуса перед началом сварки производили настройку вылета удлинительной трубки сварочного пистолета. Рабочее расстояние, при котором фокус находился непосредственно на по-

верхности обрабатываемой детали, составляло 119,5 мм. В процессе экспериментов положение фокуса изменяли в диапазоне от 0 до +10 мм относительно поверхности свариваемого материала.

Рисунок 3 демонстрирует макроструктуру сварных швов, полученных в условиях ручной лазерной сварки с использованием оптимизированных режимов. Исследование внешнего вида соединений позволило выявить ряд недостатков: ширина и высота шва варьируются неравномерно, обнаруживаются микропоры, а в отдельных участках высота усиления шва оказывается ниже уровня основного металла. Тем не менее, при соблюдении оптимальных параметров технологического процесса качество сварного соединения в целом удовлетворяет требуемым нормам.

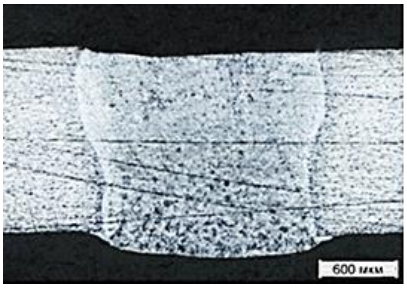


Рис. 3. Макроструктура сечения шва алюминиевого сплава 1565чМ толщиной 3 мм, полученных ручной лазерной сваркой без присадки на оптимальных режимах

Анализ большого массива экспериментов показал, что наилучшее качество соединения обеспечивается в случае применения лазера с модуляцией луча: частота колебаний составляет 200 герц, а размах отклонения равен 1,5 миллиметра.

Качество сварных швов оценивалось путем рентгенографического анализа всех изготовленных образцов, что позволило определить влияние параметров сварочного процесса и способов подготовки стыков. На рисунке 4 отражены данные о количестве пор, возникающих в зависимости от удельной погонной энергии сварки и методов очистки торцевых поверхностей.

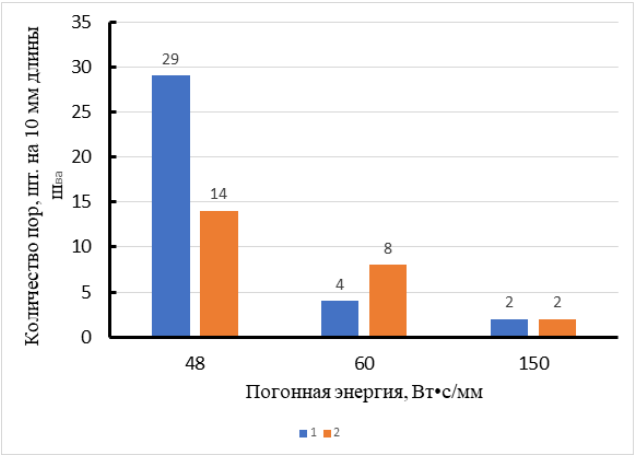


Рис. 4. Зависимость количества пор от погонной энергии сварки и способа очистки поверхности листов сплава 1565 чМ

Полученные данные свидетельствуют о том, что снижение погонной энергии приводит к увеличению количества пор. При этом максимальная погонная энергия обеспечивает сопоставимую эффективность как химического травления, так и лазерной очистки. Это позволяет использовать одно и то же оборудование для удаления оксидных пленок непосредственно перед началом ручной сварки, что способствует экономии рабочего времени, сокращению расхода химических веществ и улучшению экологической обстановки технологического процесса.

На рисунке 5 показано количество дефектов в виде пор, возникающих при различных режимах колебаний лазерного луча и методах подготовки торцов стыка листов сплава 1565чМ толщиной 3 мм.

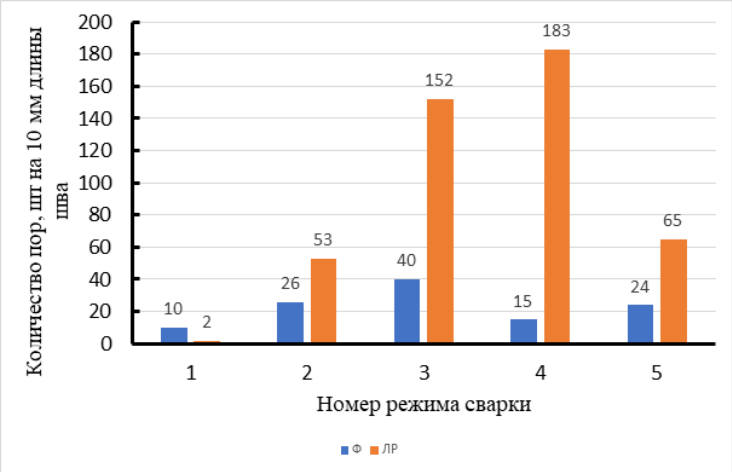


Рис. 5. Зависимость образования количества пор от способа подготовки торцов кромок стыковых соединений сплава 1565чМ толщиной 3 мм и режима сварки: 1 – амплитуда колебаний 2 мм частота колебаний 200 Гц; 2 – амплитуда колебаний 0,5 мм частота колебаний 200 Гц; 3 – амплитуда колебаний 2 мм частота колебаний 25 Гц; 4 – амплитуда колебаний 0,5 мм частота колебаний 25 Гц; 5 – без колебаний луча

Исследование данных гистограммы (рис. 5) демонстрирует, что использование лазерного луча с параметрами 200 Гц и 1,5 мм в плане амплитуды колебаний существенно уменьшает пористость, сводя её уровень к абсолютному минимуму. Максимальный положительный результат фиксируется при обработке стыковых соединений, предварительно обработанных фрезерованием на торцах.

Для расширения функциональных возможностей ручной лазерной сварки было внедрено использование присадочной проволоки. Такой подход позволяет восполнять дефицит основного материала при наличии зазоров в стыках, а также способствует повышению механической прочности соединения благодаря процессу легирования.

Эксперименты по лазерной сварке с подачей присадочной проволоки проводили при следующих условиях:

– Присадочный материал: алюминиевая проволока марки СвАМг63 диаметром 1 мм;

Скорость подачи присадочной проволоки: от 1,0 до 1,5 м/мин;

– Мощность лазерного излучения: выросла до 1300–1500 Вт вследствие воздействия присадки;

– Скорость сварки: варьировалась от 0,8 до 1,3 м/мин;

– Параметры колебаний лазерного луча: частота: до 300 Гц, амплитуда: 0,5–1,5 мм.

Подготовка образцов перед сваркой методом фрезерования торцов и химического травления поверхности свариваемых пластин.

Макроструктура соединений, полученных ручной лазерной сваркой с присадочной проволокой, показаны на рис. 6.

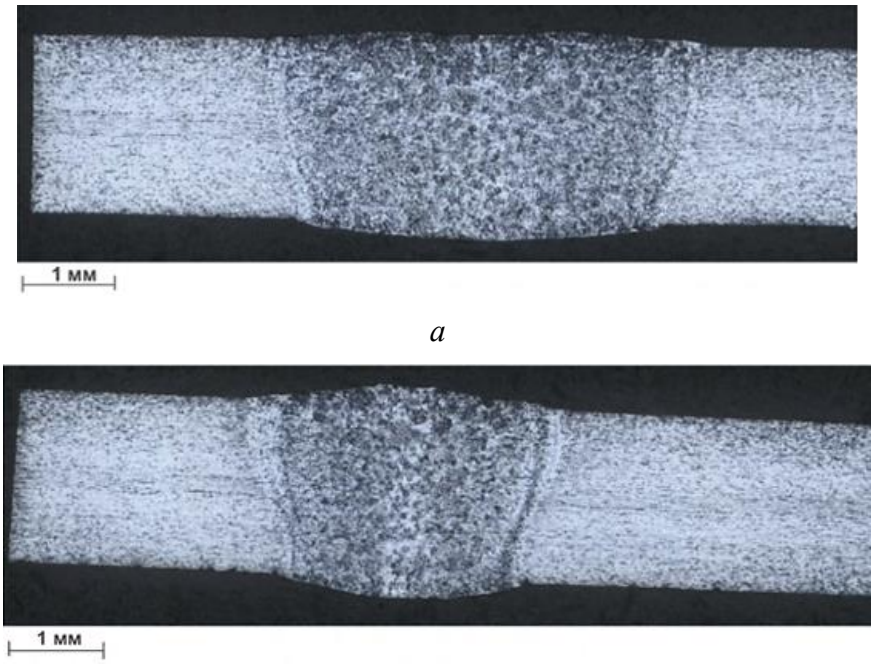


Рис. 6. Макроструктура соединений толщиной 3 мм, полученных ручной лазерной сваркой с присадочной проволокой:
а – погонная энергия 96,7 Вт с/мм, скорость подачи проволоки 1,0 м/мин, частота колебаний 300 Гц, амплитуда 0,5 мм; б – погонная энергия 71,6 Вт с/мм, скорость подачи проволоки 1,5 м/мин, частота колебаний 300 Гц, амплитуда 0,5 мм

Внешнее формирование шва при сварке с применением присадочного материала значительно улучшается по сравнению со сваркой без присадки. В частности, наблюдается уменьшение неравномерности шва, исчезают поверхностные раковины, а также устраняется эффект занижения шва относительно основного металла.

Аналогично процессу сварки без присадочного материала при сварке с присадкой наблюдается зависимость количества пор от параметров колебаний лазерного луча (рис. 7).

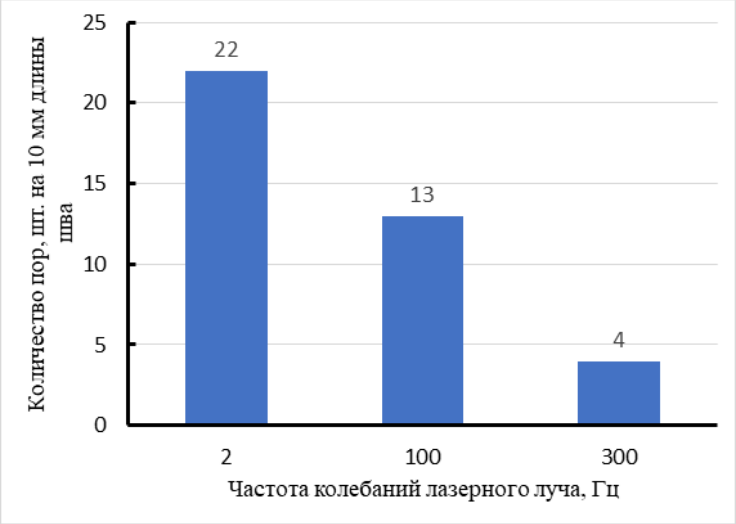


Рис. 7. Зависимость количества пор при ручной лазерной сварке сплава АМг6 с присадочной проволокой при погонной энергии сварки 72,8 Вт×с/мм и амплитуде колебаний 0,5 мм

График на рис. 7 наглядно демонстрирует, что с увеличением частоты колебаний происходит значительное снижение количества пор в сварном шве. Особенно заметное улучшение качества шва наблюдается при достижении частоты колебаний 300 Гц, где количество пор резко уменьшается.

Исследования подтвердили, что при ручной лазерной сварке алюминиевых сплавов 1565чМ и АМг6М параметры процесса оказывают значительное воздействие на качество шва. Было обнаружено, что повышение частоты колебаний луча до 200 Гц (без присадки) и до 300 Гц (с присадкой) существенно уменьшает пористость стыкового сварного соединения.

Использование присадочной проволоки способствует значительному улучшению качества внешнего вида сварного шва. Что касается методов подготовки поверхности, то фрезерование кромок зарекомендовало себя как наиболее эффективный способ снижения пористости. Вместе с тем, лазерная очистка продемонстрировала результативность, сопоставимую с химическим травлением, что создает предпосылки для внедрения более экологичных и менее трудозатратных технологий подготовки.

Установлено, что с ростом погонной энергии режима лазерной сварки уменьшается пористость шва, то есть наблюдается обратная корреляция. Исследование макроструктуры показывает, что даже при наличии локальных дефектов, таких как неравномерность и микропоры, сварные соединения, выполненные в оптимальном режиме, демонстрируют высокое качество.

Техника ручной лазерной сварки обладает внушительным потенциалом для использования в самых разных сферах, включая обработку деталей из различных материалов. Данный подход гарантирует высокую производительность и эффективность при взаимодействии с разнообразными конструкциями, что открывает новые перспективы в производственном процессе и восстановлении сложных изделий.

Список литературы

1. Катояма С. Справочник по лазерной сварке / С. Катояма. М: Техносфера. 2015. – 358 с.

2. Грезев Н. В., Шамов Е. М., Маркушов Ю. В. Сварка волоконными лазерами // Ритм машиностроения. 2016. № 7. С. 34–40,

3. Suder W. J. Investigation of the effects of basic laser material interaction parameters in laser welding / W. J. Suder, S. W. Williams // Journal of Laser Applications. 2012. Vol. 24, No. 3. P. 032009-1-032009-8. DOI: 10, 2351/1.4728136

4. Григорьянц А.Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Оборудование для лазерной обработки // М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2022. – 255 с.

5. А.В. Толкачёва, О. А. Крючина, И. Э. Садовников. Лазерная безопасность. Решение есть! Новый стандарт. Передовые концепции // Лазер–Информ. 2024. № 4 (763). С. 6–9.

6. IPG Photonics. Портативные лазерные сварочные системы [Электронный ресурс] / IPG Photonics. Электрон. дан. [Б. м.], 2023. URL: https://lasersystems.ipgphotonics.com/ru-RU/Products/Handheld-ystems/Handheld-Laser--Welding-System (дата обращения: 06.04.2026).

7. G. Barbieri, F. Cognini, M. Moncada, A. Rinaldi, and G. Lapi. Welding of automotive aluminum alloys by laser wobbling processing. Mater. Sci. Forum 879, 1057-1062 (2017).

Васильев Д.Н.
главный металлург
АО «ГМКБ «Вымпел» имени И.И. Топорова»
Россия, Москва
vndima84@mail.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ

Аннотация. В статье рассматриваются особенности формирования структуры алюминиевых сплавов при селективном лазерном плавлении (СЛП). Анализируются ключевые технологические и материаловедческие аспекты, влияющие на качество и свойства получаемых изделий. Особое внимание уделено характерным дефектам (пористость, трещины, непровары), механизмам их образования и методам минимизации. Описаны микроструктурные изменения в сплавах систем Al–Si, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Sc и Al–Zn–Mg–Cu в зависимости от режимов синтеза и легирования. Показано, что термическая обработка и микролегирование (например, цирконием или скандием) способствуют измельчению структуры, снижению пористости и повышению механических характеристик. Приведены данные о влиянии технологических параметров на остаточные напряжения и качество межслойного сцепления. Сделан вывод о перспективах оптимизации составов и режимов СЛП для повышения эксплуатационных свойств алюминиевых деталей.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление; алюминиевые сплавы; микроструктура; пористость; трещины; остаточные напряжения; термическая обработка; легирование; механические свойства.

Vasiliev D.N.
Chief Metallurgist
Vympel named after I.I. Toporov
Russia, Moscow
vndima84@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF ALUMINUM ALLOYS DURING SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. The article discusses the features of the formation of the structure of aluminum alloys during selective laser melting (SLP). The key technological and material science aspects that affect the quality and properties of the resulting products are analyzed. Particular attention is paid to characteristic defects (porosity, cracks, lack of fusion), mechanisms of their formation and methods of minimization. Microstructural changes in alloys of Al–Si, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Sc and Al–Zn–Mg–Cu systems depending on the modes of synthesis and doping are described. Heat treatment and microalloying (e.g., zirconium or scandium) have been shown to reduce structure, reduce porosity, and improve mechanical performance. Data on the influence of technological parameters on residual stresses and the quality of interlayer adhesion are presented. A conclusion is made about the prospects for optimizing the compositions and modes of SLP to improve the operational properties of aluminum parts.

Keywords: selective laser melting; aluminum alloys; microstructure; porosity; cracks; residual stresses; heat treatment; doping; mechanical properties.

Алюминиевые сплавы занимают лидирующие позиции среди конструкционных материалов в инженерной практике благодаря уникальному сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и других характеристик, что обуславливает значительный практический интерес к их адаптации для технологии селективного лазерного сплавления [1]. Среди сплавов на основе алюминия, наиболее подробно исследованных в контексте получения изделий методом СЛС, выделяются системы Al–Si, Al–Mg–Sc, Al–Cu–Mg и Al–Zn–Mg–Cu.

Процесс лазерного сплавления алюминиевых сплавов характеризуется рядом специфических особенностей [2]: окисление порошкового материала и его низкая сыпучесть; слабое поглощение лазерного излучения в сочетании с высокой отражательной способностью; повышенная склонность к образованию трещин и пор; а также значительная усадка при кристаллизации и высокая вязкость расплава. Указанные факторы могут спровоцировать появление нежелательных структурных особенностей и дефектов, что влечет

за собой ухудшение качества материала и снижение точности геометрических параметров изделий [1, 3].

В компонентах, полученных посредством лазерного спекания, возникают остаточные напряжения, способные спровоцировать падение механических характеристик, а также появление трещин и разрушение материала. Следовательно, целесообразно выполнить термообработку для снятия внутренних напряжений. Важно также осуществлять контроль уровня этих напряжений и анализировать их распределение по всему объему производимой детали.

Наибольшую перспективность среди методов контроля остаточных напряжений демонстрируют неразрушающие подходы, поскольку они исключают необходимость разрушения или фрагментации анализируемого изделия. К данной группе относятся дифракционные методики, которые реализуются с использованием гониометров, оснащенных рентгеновскими трубками, а также источниками излучения синхротронного и нейтронного типов.

На сегодняшний день наибольшее внимание в рамках технологии селективного лазерного спекания уделяется сплавам AlSi12 и AlSi10Mg [4–6]. Оперируя этими материалами и опираясь на обзор зарубежных публикаций, в данной работе кратко рассматриваются ключевые аспекты структуры полученных алюминиевых сплавов, а также перечисляются характерные дефекты, возникающие в процессе синтеза под воздействием различных факторов. Помимо этого, представлены данные научной и технической литературы, касающиеся микроструктурных особенностей и механических характеристик алюминиевых сплавов иных систем легирования, таких как Al–Cu–Mg, Al–Mg–Sc и Al–Zn–Mg–Cu.

Алюминиево-кремниевые литейные сплавы, характеризующиеся низким коэффициентом линейного теплового расширения, высокой износостойкостью и удельной прочностью, массово используются в автомобилестроении и аэрокосмической отрасли для производства деталей силовых установок и теплообменного оборудования.

Микроструктура алюминиевого сплава AlSi10Mg, полученного селективным лазерным плавлением из порошков, представлена на рис. 1.

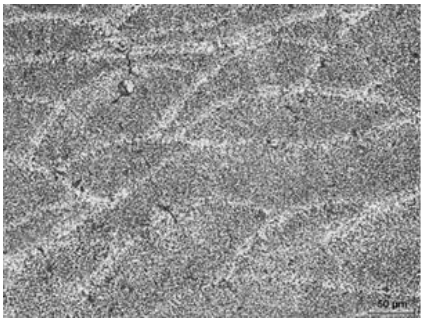


Рис. 1. Микроструктура сплава AlSi10Mg, полученного селективным лазерным плавлением из порошков

Метод СЛС обеспечивает формирование сплавов AlSi10Mg и AlSi12 с ячеисто-дендритным строением, где ячейки из алюминиевого твердого раствора отделены межъячеечными границами, обогащенными кремнием. Согласно принципам неравновесной кристаллизации, первично выделяется твердый раствор на основе алюминия, который в процессе затвердевания вытесняет кремний к границам зерен, руководствуясь его растворимостью в алюминиевой матрице в заданном температурном диапазоне. Благодаря экстремально высокой скорости охлаждения происходит затвердевание алюминия с образованием ячеистой структуры, характеризующейся повышенной концентрацией растворенного кремния. В результате остаточный кремний концентрируется в виде сегрегаций вдоль межъячеечных границ].

Благодаря тому, что кремний повышает жидкотекучесть сплава и сужает диапазон кристаллизации до минимума (вблизи эвтектической точки), в системе Al–Si фиксируется тенденция к уменьшению склонности к образованию трещин при синтезе. Это отличает данные сплавы от алюминиевых материалов других систем легирования, включая те, что содержат или не содержат кремний [7].

При использовании селективного лазерного сплавления для обработки алюминиевых сплавов, наряду с трещинами, основными недостатками выступают непровары и полости разнообразной конфигурации, включая типичные «замочные скважины». Подобные дефекты существенно снижают механические характеристики получаемого изделия. Степень пористости в таких сплавах обусловлена комплексом факторов: ключевую роль играют режимы лазерного синтеза, а также уровень содержания водорода в исходном порошке и наличие влаги на его поверхности.

Выявлено, что толщина наносимого порошкового слоя существенно воздействует на качество межслойного сцепления. Уменьшение толщины слоя способствует повышению степени связи между слоями и, как следствие, увеличению средней плотности сформированного изделия, однако это приводит к замедлению процесса печати.

Еще одной распространенной проблемой в алюминиевых сплавах, созданных методом селективного лазерного сплавления, являются трещины. В процессе СЛП обычно фиксируются два типа дефектов: горячие и ликвационные. Первые образуются из-за высоких остаточных растягивающих напряжений, вызванных значительной разницей температур между расплавленной и затвердевающей зонами. Вторые, в свою очередь, появляются в областях, где плавление произошло лишь частично или не завершилось вовсе.

Ячеисто-дендритная структура сплавов системы Al–Si изменяется в зависимости от содержания Si [8]. С увеличением содержания кремния в сплавах системы Al–Si, полученных методом СЛП, формируются мелкие дендритные структуры с размером ячеек ~0,5 мкм. Границы ячеек декорированы выделениями Si, которые утолщаются при увеличении содержания Si

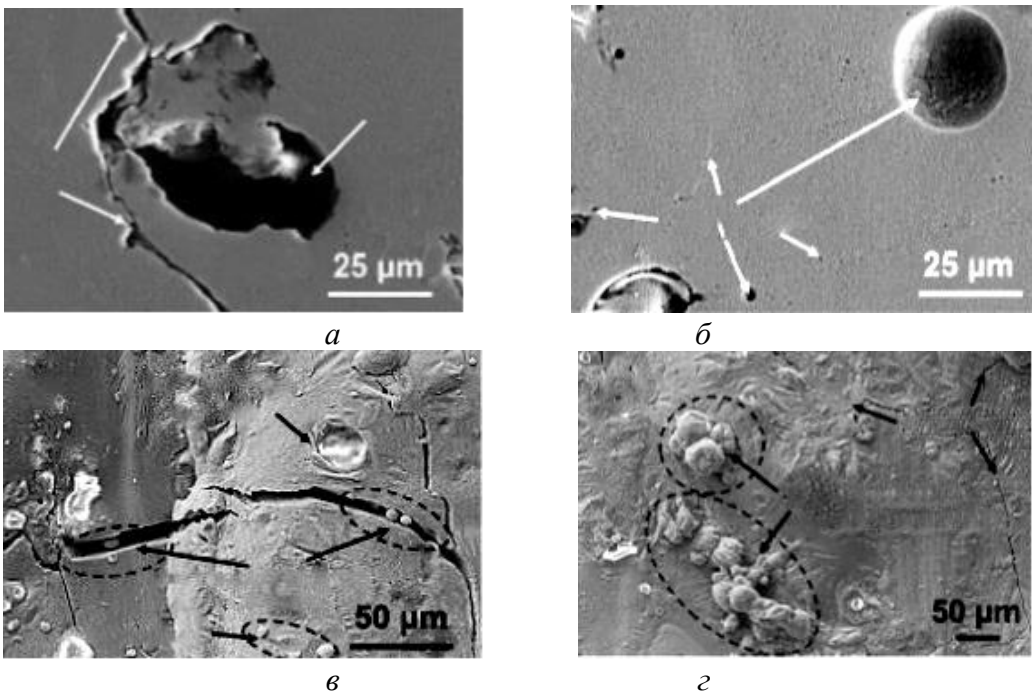
больше 12% (по массе) из-за зарождения первичных выделений Si вдоль границ.

Термическая обработка изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления, представляет собой критически важную стадию перед их отделением от платформы, так как она предотвращает появление трещин и деформаций, а также обеспечивает формирование заданной структуры и характеристик материала.

Проведение отжига инициирует переход исходной ячеистой структуры сплава AlSi12, синтезированного методом селективного лазерного сплавления, в композитную структуру, представляющую собой матрицу из алюминиевого твердого раствора с распределенными отдельными частицами кремния, которые формируются в ходе термообработки.

Алюминиевые сплавы на основе системы Al–Cu–Mg, обладающие способностью к термическому упрочнению, активно используются в аэрокосмической индустрии [9]. Основными легирующими добавками, наряду с медью, выступают магний и кремний, при этом в состав могут входить марганец, железо, ванадий и другие элементы. Химический состав определяет формирование таких ключевых фаз, как θ(Al_2Cu), S(Al_2Mg(Cu, Si, Zn)), Si, Mg_2Si и Q($Al_4CuMg_6Si_6$).

Анализ сплава 2024, подвергнутого обработке с разными плотностями энергии (за счёт регулировки мощности и скорости сканирования), показал: оптимизация режимов позволяет существенно снизить количество дефектов – таких как газовая пористость и непровары, – однако полностью исключить их не удаётся (см. рис. 2).



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Дефекты структуры, образовавшиеся в синтезированном сплаве 2024 после СЛП (РЭМ)

Ключевым параметром, определяющим характер возникающих дефектов, выступает степень перегрева ванночки расплавленного материала. Увеличение энергетического воздействия способствует снижению количества пор, поскольку возросшая текучесть жидкости позволяет ей эффективнее заполнять усадочные пустоты в процессе кристаллизации. При фиксированной скорости сканирования усиление лазерного излучения ведет к росту температурного градиента и расширению зоны перегретого расплава. В то же время увеличение размеров столбчатых кристаллических зерен повышает риск появления трещин вдоль их границ.

Исследование сплава 2024, модифицированного 0,7 мас.% наночастиц титана для предотвращения горячих трещин и измельчения структуры первичного алюминия, показало формирование наночастиц Al_3Ti с упорядоченной структурой L12. После термообработки по режиму T6 предел прочности при растяжении достиг 435 МПа при относительном удлинении 10%, что сопоставимо с показателями материала, полученного традиционным способом [10].

Введение добавки Zr на образование трещин, микроструктуру и механические свойства сплава системы Al–Cu–Mg, полученного методом СЛП. Микролегирование цирконием позволило уменьшить образование трещин из-за формирования выделений Al_3Zr, которые действуют как зародыши для зерен α-Al во время затвердевания, что приводит к измельчению зерен (рис. 3).

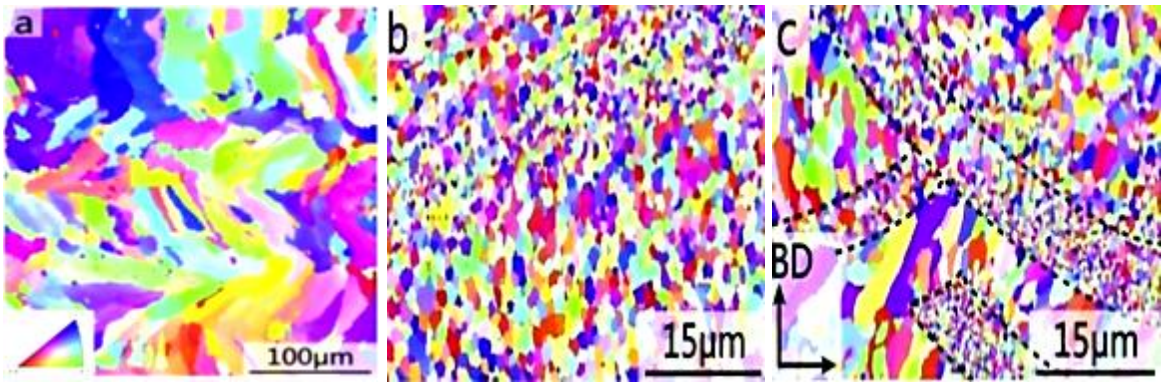
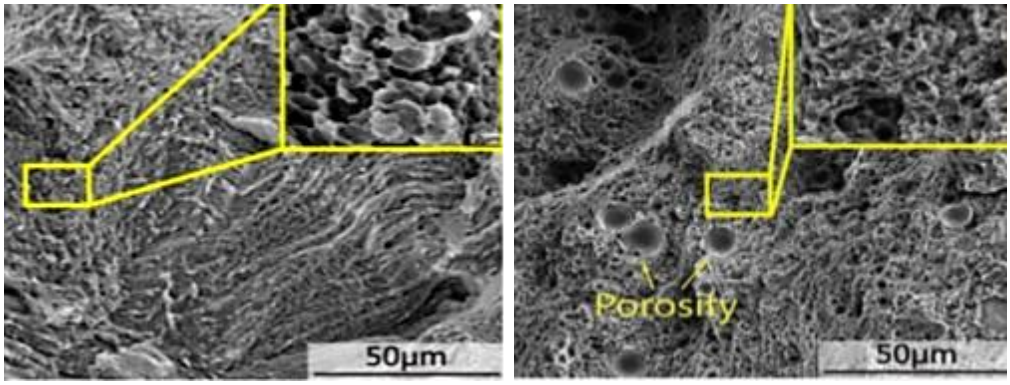


Рис. 3. EBSD-карты для сплавов систем Al–Cu–Mg (а) и Al–Cu–Mg–Zr (б, в) для образцов, изготовленных со скоростью сканирования 5 (а, б) и 15 м/мин (в)

Как демонстрирует рисунок 3, а, сплав Al–Cu–Mg, синтезированный посредством СЛП, характеризуется наличием крупных столбчатых зерен. Однако введение в состав циркония приводит к существенному изменению морфологии структуры: зерна приобретают ультрамелкий или наноразмерный размер и становятся равноосными, что иллюстрируется на рисунках 3, б и 3, в.

На рисунке 4 представлены микроструктуры поверхностей излома образцов, изготовленных из сплавов на основе Al–Cu–Mg и Al–Cu–Mg–Zr, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии. В материале системы Al–Cu–Mg, легированном цирконием, наблюдаются мелкие

впадины размером от 0,4 до 0,9 мкм, что указывает на преобладание хрупкого механизма разрушения данного образца.



а *б*

Рис. 4. Изображения поверхностей разрешения образца из сплава системы Al–Cu–Mg, изготовленного со скоростью сканирования 5 м/мин (а), и образца из сплава системы Al–Cu–Mg–Zr, изготовленного со скоростью сканирования 15 м/мин (б)

Для изготовления деталей методом селективного лазерного плавления (СЛП) алюминиево-магниевые композиции обычно модифицируют цирконием и скандием. Данные легирующие добавки позволяют достичь высокой плотности материала (в диапазоне 99,2–99,9%) при соблюдении допустимых параметров печати, а также существенно улучшает структуру сплава. Однако даже незначительное содержание скандия приводит к резкому удорожанию порошка, что выступает серьезным барьером для массового внедрения таких материалов в промышленность.

Добавление скандия и циркония в алюминиево-магниевые сплавы комплексно повышает их эксплуатационные характеристики. На этапе кристаллизации формирование интерметаллидов Al_3Sc и Al_3Zr выступает в роли центров гетерогенного зародышеобразования, что приводит к измельчению первичных зерен алюминия. Согласно механизму Холла–Петча, это усиливает механическую прочность материала, а также блокирует рост столбчатых структур, склонных к образованию горячих трещин – распространенного дефекта в традиционных алюминиевых сплавах. Кроме того, при термической обработке для снятия напряжений (в диапазоне 275–325 °C) выделяются вторичные частицы тех же интерметаллидов. Благодаря низкой скорости диффузии скандия и циркония в алюминиевой матрице, они обеспечивают выраженное дисперсионное упрочнение и сохраняют стабильность свойств при последующем нагреве до 150–200 °C.

Самым узнаваемым материалом в системе Al–Mg–Sc за пределами России выступает сплав Scalmalloy. Этот материал, созданный концерном Airbus Group специально для технологий аддитивного производства, демонстрирует рекордную для алюминиевых сплавов, применяемых в 3D-печати, прочность: его предел текучести превышает 470 МПа, предел прочности достигает более 520 МПа, а относительное удлинение составляет около 13%.

Алюминиевые многокомпонентные сплавы, содержащие цинк, магний и медь, способны к упрочнению при термической обработке и широко востребованы в авиакосмическом секторе благодаря исключительной прочности. Тем не менее, они обладают высокой склонностью к растрескиванию в ходе селективного лазерного плавления.

В исследовании [11] был проанализирован химический состав сплава 7075 до и после воздействия СЛП. Было зафиксировано снижение массовой доли цинка с 5,8% до 3,9%, а магния – с 2,6% до 2,1%. Уменьшение концентрации Zn и Mg способно негативно сказаться на механических характеристиках сплава 7075, так как данные легирующие компоненты играют ключевую роль в упрочнении твердого раствора и дисперсионном твердении фазы $MgZn_2$. Кроме того, при низких соотношениях Zn:Mg в сплаве 7075 возможно формирование Т-фазы – $(AlZn)_{49}Mg_{32}$.

Введение наночастиц циркония в порошок сплава 7075 способствует формированию равномерно распределенных интерметаллидов Al_3Zr. Эти частицы выступают ядрами кристаллизации для первичного алюминия в процессе затвердевания, что обеспечивает формирование мелкозернистой равноосной структуры. Такая микроструктура эффективно препятствует зарождению и развитию микротрещин. После проведения термической обработки по режиму Т6 материал демонстрирует следующие механические характеристики: предел текучести находится в диапазоне 325–373 МПа, предел прочности составляет 383–417 МПа, а относительное удлинение варьируется от 3,8 до 5,4%.

Применение сварки плавлением (автоматическая аргонодуговая сварка с присадочным металлом) позволила сформировать сварные швы с усилением и проплавом в зоне шва.

Макроскопическое исследование полированных шлифов сварных соединений сплава AlSi10Mg выявило высокую общую пористость сварных швов, причем более крупные поры преимущественно находились в верхней части шва. Во всех образцах вдоль границы сварочной ванны была видна тонкая полоса мелких пор. Еще одним важным наблюдением было скопление пор в центре сварочной ванны (рис. 5).

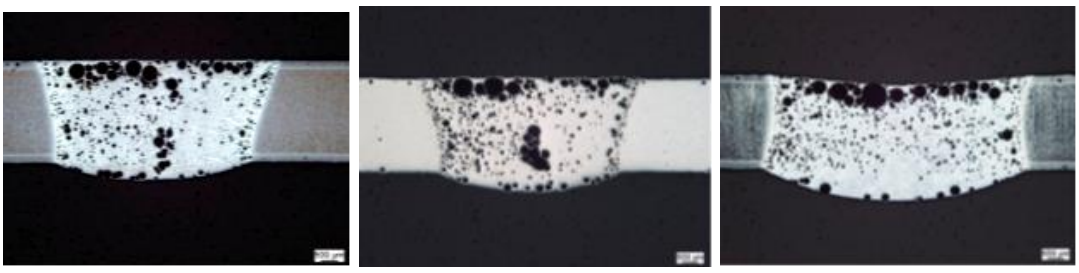


Рис. 5. Пористость в сварных швах сплава AlSi10Mg, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой

Установлено, что выбор параметров режима сварки существенно влиял на полученный профиль шва. При применении режима на низкой скорости сварки при малом значении тока дуги наблюдается меньшее провисание шва при его малой ширине, чем при сварке на режимах с высокой погонной энергией.

Металлографические исследования показали, что суммарная площадь пор в поперечном сечении шва в зависимости от режима сварки составляет 11–19%. Установлено, что образцы с присадочным материалом проявляли небольшую тенденцию к сниженной пористости. Однако из-за ограниченного размера выборки этот эффект не был статистически значимым.

Образование во всех сериях более тонкой полосы пор у края сварного шва указывает на повышенное зарождение пор в этой области. Неровная граница сварочной ванны вместе с локальными дефектами на ней может служить центрами зарождения пор. Можно предположить, что большая часть водорода, растворенного в расплаве, поступает в него диффузией из основного материала, что повышает концентрацию водорода в сварочной ванне.

Список литературы

1. Kimura T., Nakamoto T. Thermal and mechanical properties of commercial-purity aluminum fabricated using selective laser melting // Materials Transactions. 2017. Vol. 58. P. 799–805.

2. Montero Sistiaga M.L., Mertens R., Vrancken B. et al. Changing the alloy composition of Al7075 for better processibility by selective laser melting // Materials Processing Technology. 2016. Vol. 238. P. 437–445.

3. Kruth J., Levy G., Klocke F., Childs T.H.C. Consolidation phenomena in laser and powder-bed fusion layered manufacturing // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2007. Vol. 56. P. 730–759.

4. Фомина М.А., Дынин Н.В., Шортиков С.В., Морозова С.Е. Коррозионное поведение алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). Ст. 11. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 03.10, 2022). DOI: 10, 18577/2307-6046-2018-0-4-91-100.

5. Дынин Н.В., Заводов А.В., Оглодков М.С., Хасиков Д.В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплавов системы Al–Si–Mg // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 01. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 03.10, 2022). DOI: 10, 18577/2307-6046-2017-0-10-1-1.

6. Мовенко Д.А., Шуртаков С.В. Причины образования микротрещин и снижение плотности их распределения в изделиях из никелевых жаропрочных сплавов, изготовленных методом СЛС (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 04. URL: http://www.journal.viam.ru (дата обращения: 20, 10, 2022). DOI: 10, 18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.

7. Handbook of Aluminum. Vol. 2: Alloy Production and Materials Manufacturing / eds.: G.E. Totten, D.S. MacKenzie. CRC Press: Boca Raton, 2003. 736 p.

8. Siddique S., Imran M., Walther F. Very high cycle fatigue and fatigues crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy // International Journal of Fatigue. 2017. Vol. 94. P. 246–254.

9. Zhang H., Zhu H., Nie X. et al. Fabrication and heat treatment of high strength Al–Cu–Mg alloy processed using selective laser melting // International Society for Optics and Photonics. 2016. DOI: 10, 1117/12.2211362.

10, Tan Q., Zhang J., Sun Q. et al. Inoculation treatment of an additively manufactured 2024 aluminium alloy with titanium nanoparticles // Acta Materials. 2020, Vol. 196. P. 1–16.

11. Li X.P., Wang X.J., Saunders M. et al. A selective laser meltign and solution heat treatment refined Al–12Si alloy with a controllable ultrafineeutectic microstrcuture and 25% tensile ductility // Acta Materialia. 2015. Vol. 95. P. 74–82.

Типалин С.А.
к.т.н., профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
tsa_mami@mail.ru
Фролов Н.Л.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
frolovnl@yandex.ru
Климов В.А.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vladimirklimov0207@gmail.com
Шпунькин Н.Ф.
к.т.н., профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
snf48@yandex.ru

ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ХОЛОДНОКАТАНОГО ЛИСТА

Аннотация. В статье рассматриваются результаты испытания на сжатия листового холоднокатаного материала в разных направлениях, вдоль и поперек плоскости листа. Для соблюдения одинаковых условий деформирования испытания проводились в щелевом штампе. Образцы предварительно собирались в пакет из десяти заготовок. При этом виде испытаний образцов схема деформирования соответствовала плоской деформации. Эксперименты показали изменение свойств материала в зависимости от направления прикладываемой силы вдоль и поперек плоскости листа. Экспериментальные данные сравнивались с численными значениями, которые были рассчитаны с помощью программного комплекса. Для расчетов использовалась кривая упрочнения полученная при предварительный испытаниях на одноосное растяжение. Аппроксимация кривой упрочнения проводилась по степенной зависимости. Сравнение экспериментальный данных при деформации материала в разных направлениях отличается между собой приблизительно на 50%. Показано, что для расчета деформационно-силовых параметров при нагружении в перпендикулярной плоскости листа, необходимо учитывать изменение свойств материала в поперечном направлении.

Ключевые слова: растяжение, сжатие, листовой материал, свойства листа, анизотропия листа.

Tipalin S.A.
Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Material Forming and Additive Manufacturing

Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
tsa_mami@mail.ru
Frolov N.L.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
frolovnl@yandex.ru
Klimov V.A.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vladimirklimov0207@gmail.com
Shpunkin N.F.
Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Material Forming and Additive Manufacturing
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
snf48@yandex.ru

ASSESSING THE ANISOTROPY OF COLD-ROLLED SHEET

Abstract. The article discusses the results of compression tests on cold-rolled sheet material in different directions, along and across the sheet plane. To ensure uniform deformation conditions, the tests were conducted in a slot die. The samples were pre-assembled into a package of ten pieces. In this type of test, the deformation pattern corresponded to plane deformation. The experiments revealed changes in the material's properties depending on the direction of the applied force, both along and across the sheet plane. The experimental data were compared with numerical values calculated using a software package. The calculations were based on the hardening curve obtained during preliminary uniaxial tension tests. The hardening curve was approximated using a power function. The comparison of experimental data obtained during material deformation in different directions shows a difference of approximately 50%. It is shown that in order to calculate the deformation and force parameters during loading in the perpendicular plane of the sheet, it is necessary to take into account the change in material properties in the transverse direction.

Keywords: tension, compression, sheet material, sheet properties, sheet anisotropy.

Широкое использование холоднокатаного листового материала ставит исследование его свойств в приоритетное направление. От точности задания механических характеристик листового проката зависит разработка технологии изготовления тонколистовых изделий, выбор количества операций, конструктивные особенности штамповой оснастки и выбор применяемого оборудования. Современные программные комплексы обладают хорошими алгоритмами, позволяющим с высокой точностью прогнозировать пластическое формоизменение при штамповке изделий. Поэтому точность получаемых вычислений напрямую зависит от корректности заданных свойств деформируемого материала и граничных условий в ходе пластического формоизменения.

При работе с холоднокатаными листовыми материалами большое число авторов исследуют анизотропию листа. При определении свойств листа в основном пользуются методом одноосного растяжения. Для построения диаграммы предельного формоизменения применяют в дополнении к вышеназванному способу двухосную деформацию в плоскости листа. Исследования показывают, что листовой материал обладает анизотропией и его свойства меняются в зависимости от направления прокатки [1–6].

Однако в листовой штамповке встречаются операции основная силовая нагрузка происходит в направлении перпендикулярным плоскости листа. К таким операциям относятся правка, чеканка, вальцовка с перегибом. При этом металл подвергается сжатию перпендикулярно плоскости листа. Работы по определению свойств листового материала при испытаниях на сжатие носят ограниченный характер, и в основном сравнивают характеристики кривой упрочнения растяжения и сжатия в плоскости листа [7, 8].

В связи с этим возникает вопрос о свойствах материала при приложении нагрузки перпендикулярно плоскости листа.

Цель работы заключалась в определении адекватности использования механических свойств материала, полученных при деформации листового образов в плоскости листа для расчета деформационных параметров листовой заготовки при нагрузки поперечном направлении.

В качестве исходного материала была выбрана сталь Ст2сп для которой методом одноосного растяжения образцов были получены, данные позволяющие вычислить коэффициенты кривой упрочнения. Образцы размерами 10х100х1 мм были вырезаны по отношению к прокатке в трех направлениях: вдоль, поперек и под углом 45 градусов. После чего строилась усредненная кривая упрочнения, коэффициенты которой вычислялись аппроксимацией. Аппроксимация проводилась по степенной зависимости, и полученная формула интенсивности напряжений от интенсивности логарифмической деформации имеет вид:

$$\sigma = 780\varepsilon^{0,27}$$

Растянуть листовой материал в направлении его толщины очень затруднительно. Поэтому удобно изменить схему деформирования на сжатие. Однако изменение схемы деформирования может сказаться на результатах. Поэтом было решено проводить сравнительные эксперименты на сжатие листа в поперечном и продольном направлении в щелевом штампе. Для удобства проведения экспериментов и увеличение точности измерений деформацию образцов осуществляли в виде пакета из 10 штук. Для этого изготавливали образцы 10×10 мм и собирали их в пакет из 10 штук. При деформации в щелевом штампе возникает плоско деформируемое состоянии материала, при котором образцы уменьшаются в вертикальном направлении и изменяют свою ширину перпендикулярно направлению прилагаемой нагрузки. В третьем направлении их деформация ограничивается стенками инструмента.

Испытания проводили на гидравлическом прессе EU100 с максимальной нагрузкой 100 тонн. Силовые параметры измерений фиксировались автоматически с помощью компьютерной техники. По результатам экспериментальных исследований построены графики зависимости силы от деформации (рисунок 2 и 4). Для оценки адекватности расчетов деформации с зависимостью упрочнения полученному при испытаниях на растяжения проведено моделирования аналогичных процессов в программном комплексе Q-form, значения которых показаны в виде графиков на рисунках 1 и 3.

Графики расчетные и экспериментальных значений при расположении пакета образцов вертикально показаны на рисунке 1, 2.

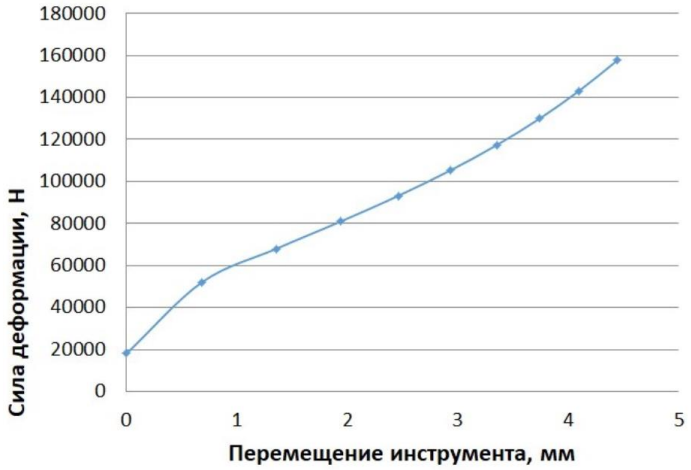


Рис. 1. График зависимости силы от перемещения при деформации пакета с вертикальным расположением листов (расчетные данные)

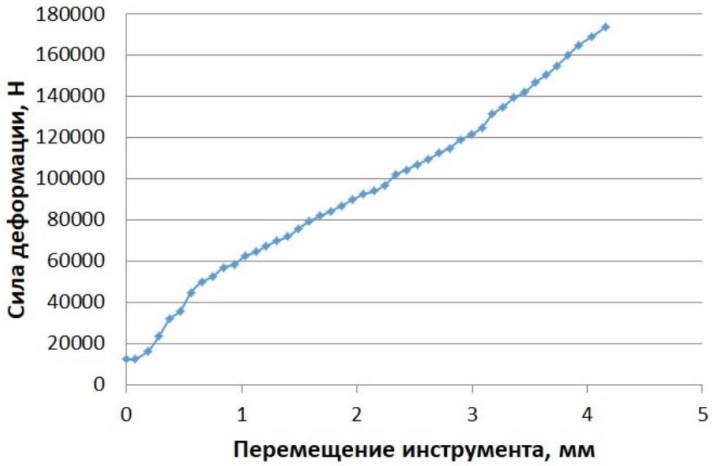


Рис. 2. График зависимости силы от перемещения при деформации пакета с вертикальным расположением листов (экспериментальные данные)

Сравнение графиков экспериментальных и расчетных при расположении образов вертикально относительно прикладываемой нагрузки показало хорошую сходимость результатов. Отклонение составило около 7%, что

возможно связано с граничными условиями и тем, что в качестве коэффициентов кривой упрочнения взяты среднее значения относительно угла прокатки. Сопоставив данные, полученные в результате экспериментов, можно заметить, что начиная с перемещения 1 мм экспериментальные значения превышают расчетные.

При сравнении расчетных и экспериментальных данных (рис. 3 и 4) при деформации пакета, в котором листы расположены горизонтально, показало значительное отклонение при сравнении графических данных. Так при деформации около 35% расчетные данные превышают экспериментальные приблизительно на 50%. Это может говорить о том, что при горизонтальном расположении лист более податливый. При этом возможные неточности связанные с заданием условий моделирования должны были давать аналогичный эффект при расчетах в компьютерной программе. Однако существенные отклонение от экспериментальных данных позволяет говорить о ярко выраженной анизотропии материала в разных направлениях, вдоль и поперек плоскости листа.

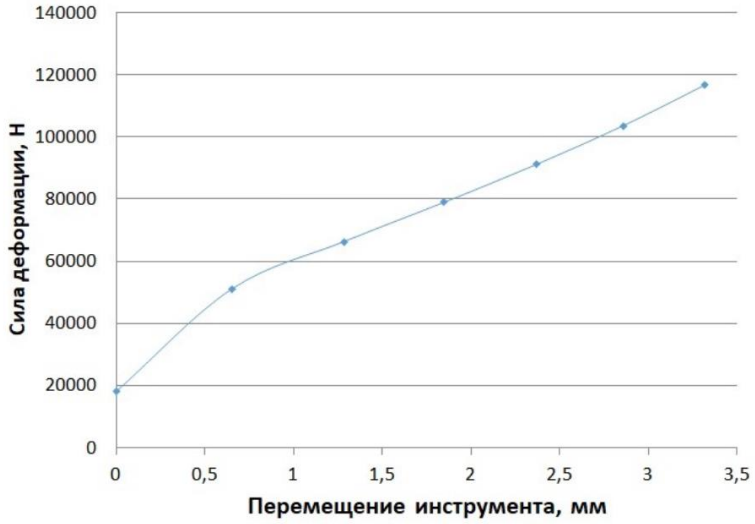


Рис. 3. График зависимости силы от перемещения при деформации пакета с горизонтально расположением листов (расчетные данные)

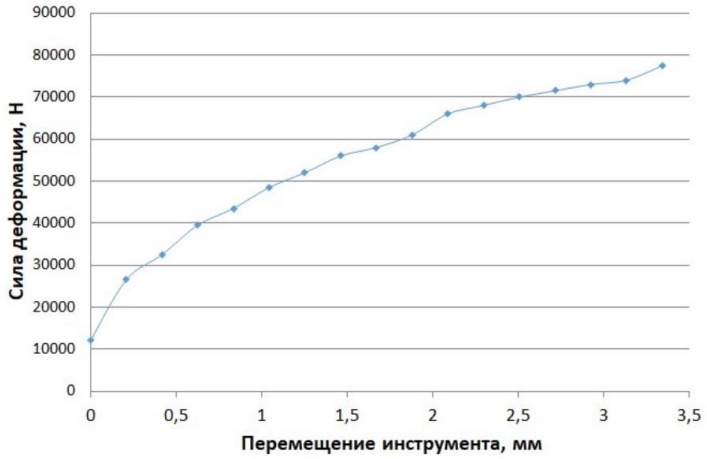


Рис. 4. График зависимости силы от перемещения при деформации пакета с горизонтальным расположением листов (экспериментальные данные)

Результаты экспериментов в щелевом штампе позволили установить ярко выраженной анизотропии материала в разных направлениях, вдоль и поперек плоскости листа. Сравнение экспериментальных данных и расчетных показало, что при вертикальном расположении образцов осаживаемого листового материала, можно применять данные кривой упрочнения полученных при растяжении образцов. Однако для деформации перпендикулярной плоскости листа необходимо учитывать изменение свойств материала в поперечном направлении.

Список литературы

1. Яковлев С. П. Обработка давлением анизотропных материалов / С. П. Яковлев, С. С. Яковлев, В. А. Андрейченко// Кишинев : Квант, 1997. – 331 с.
2. Яковлев С.П. Штамповка анизотропных заготовок/ С. П. Яковлев, В. Д. Кухарь // М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
3. Хван А. Д. Пластическая анизотропия металлических сплавов/ А. Д. Хван, Д. В. Хван, А. А. Воропаев // Металлы. 2020, № 3. С. 103–108.
4. Осипок, Т. В. Оценка анизотропии механических свойств листового проката из углеродистой стали / Т. В. Осипок, С. А. Зайдес // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020, – Т. 24, № 5(154). – С. 1007–1018. – DOI 10, 21285/1814-3520-2020-5-1007-1018. – EDN DZIIPO.
5. Устранение фестонообразования при вытяжке цилиндрических оболочек из листовых металлов с плоскостной анизотропией механических свойств / В. А. Коротков, В. И. Платонов, Ю. В. Бессмертная, и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2018. – № 10, – С. 34–38. – EDN YRRNXN.
6. Адамов, А. А. Экспериментальная идентификация законов пластичности и разрушения анизотропной малоуглеродистой листовой стали для моделирования холодной штамповки / А. А. Адамов, И. Э. Келлер, Д. С. Петухов // Проблемы прочности и пластичности. – 2019. – Т. 81, № 2. – С. 202–211. – DOI 10, 32326/1814-9146-2019-81-2-202-211. – EDN YQNPKW.
7. Построение кривых упрочнения листовых материалов с помощью опытов на продольное сжатие / А. В. Власов, Ю. В. Майстров, А. И. Алимов, А. Б. Пономаренко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 10–1. – С. 43–56. – EDN TGKWKR.
8. Шапиевская, В. А. Сравнение результатов моделирования испытания плоских образцов на сжатие / В. А. Шапиевская, В. В. Елизаров, Ю. М. Елизаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 11–2. – С. 129–130, – EDN MYFXKG.

Утяганова В.Р.
к.т.н., научный сотрудник кафедры металловедения цветных металлов
НИТУ МИСИС
Россия, Москва
vr.utiaganova@misis.ru
Харисов К.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
harmsovk202@gmail.com
Семин В.О.
к.ф.-м.н., инженер научного проекта кафедры металловедения цветных металлов
НИТУ МИСИС
Россия, Москва
viktor.semin.tsk@gmail.com
Зотов Б.О.
аспирант,
инженер научного проекта кафедры металловедения цветных металлов
НИТУ МИСИС
Россия, Москва
zotovboris98@gmail.com
Шишкин Д.В.
аспирант,
ассистент кафедры технологии металлов
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, Москва
ShishkinDmV@mpei.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА MG-AL-ZN-MN, ИЗГОТОВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Аннотация. Исследована микроструктура, фазовый и химический состав сплава системы Mg-Al-Zn-Mn, полученного методом электронно-лучевого проволочного аддитивного производства (ЭЛАП). С использованием оптической, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии установлено, что в исходном (напечатанном) состоянии структура сплава представлена матричными зёрнами α-Mg овальной формы со средним размером ~30 мкм, а также интерметаллидами $Mg_{17}Al_{12}$ (размером ~200 нм) и примесной фазой Al_8Mn_5 (~1,5 мкм). Обнаружена дефектная субструктура из дислокаций, принадлежащих системе скольжения {10–11}<11–20>. Обнаружено, что по высоте напечатанного изделия относительная доля магния уменьшается, что свидетельствует об его селективном испарении. После низко- и высокотемпературных отжигов (Т1, Т2) формируется рекристаллизованная равноосная структура со средним зерном до 43 мкм.

Ключевые слова: сплав AZ31; структура; аддитивное производство; электронный луч; металлография, характеристика материала.

Utyaganova V.R.
Candidate of Technical Sciences, Research Fellow
of the Department of Non-Ferrous Metallurgy

NUST MISIS
Russia, Moscow
vr.utiaganova@misis.ru
Kharisov K.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
harmsovk202@gmail.com
Semin V.O.
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, scientific project engineer of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals
NUST MISIS
Russia, Moscow
viktor.semin.tsk@gmail.com
Zotov B.O.
Postgraduate Student,
Scientific Project Engineer of the Department of Non-ferrous Metals
NUST MISIS
Russia, Moscow
zotovboris98@gmail.com
Shishkin D.V.
Postgraduate Student, Assistant of the Department of Metal Technology
National Research University «MPEI»
Russia, Moscow
ShishkinDmV@mpei.ru

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL CHARACTERISTICS AND CHEMICAL COMPOSITION OF MG-AL-ZN-MN ALLOY PRODUCED BY ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract. The microstructure, phase and chemical compositions of the Mg-Al-Zn-Mn alloy obtained by electron beam wire additive manufacturing (EBAM) have been certified. Using optical, scanning, and transmission electron microscopy, it was found that in the initial (printed) state, the alloy structure is represented by oval-shaped α-Mg matrix grains with an average size of ~30 microns, as well as $mg_{17}al_{12}$ intermetallides (~200 nm in size) and the Al_8Mn_5 impurity phase (~1.5 microns). A defective substructure of dislocations {10–11}<11–20> was found and a selective loss of magnesium along the height of the printed product was recorded. After low- and high-temperature annealing (T1, T2), a recrystallized equiaxed structure with an average grain of up to 43 microns is formed.

Keywords: AZ31 alloy; structure; additive manufacturing; electron beam; metallography, material characteristics.

Магниевые сплавы являются одними из самых легких конструкционных материалов, которые обладают высокой удельной прочностью и жесткостью, легко обрабатываются механически и обеспечивают хорошую защиту от электромагнитного излучения. Поэтому они широко применяются в различных областях, таких как автомобилестроение, электроника и аэрокосмическая промышленность [1].

Долгое время изделия из магниевых сплавов получали преимущественно литьём, обработкой давлением или методами порошковой металлургии [2–5]. Однако высокая стоимость и длительность производственного цикла этих традиционных подходов ограничивают применение магниевых сплавов, особенно при создании деталей со сложной геометрией. Введение высокопроизводительных технологий способствует ускорению всех этапов производства, повышению гибкости производственных процессов и созданию высокотехнологичных продуктов [6]. В силу характерных особенностей магниевых сплавов (высокое сродство к кислороду, значительное давление паров и относительно низкие температуры кипения) выбор подходящей аддитивной технологии становится ключевым фактором при получении высококачественных конструкционных деталей из этих сплавов.

В настоящее время в области аддитивного производства магниевых сплавов преобладают два метода: селективное лазерное плавление (СЛП, Selective Laser Melting, SLM) и дуговое проволочное аддитивное производство (ДПАП, wire arc additive manufacturing, WAAM,). Процесс СЛП сопряжён с рядом технологических трудностей, обусловленных низкой температурой кипения магния, его высокой теплопроводностью и высокой отражательной способностью [7–9]. Однако практическое применение СЛП для изготовления магниевых сплавов ограничено ввиду того, что селективное лазерное воздействие на слой порошка сопряжено с рисками взрыва. Кроме того, данному методу присущи такие дефекты, как лазерное разбрызгивание, шарообразование и окисление [10]. Следовательно, СЛП не является оптимальным методом получения магниевых сплавов, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий. Метод дуговой проволочной аддитивной технологии также имеет серьёзные ограничения, такие как высокая пористость, значительные остаточные напряжения и склонность к трещинообразованию. Вероятно, по этой причине число публикаций, связанных с WAAM технологией получения для магниевых сплавов, заметно уступает методу СЛП. В работе [11] показано, что для сплава AZ31 эффективное управление тепловложением в методе WAAM позволяет подавить рост зерна и снизить пористость. Тем не менее, широкое промышленное внедрение WAAM достаточно низкое из-за сохраняющейся высокой пористости, испарения легирующих элементов и горячих трещин.

В последние годы всё большее внимание привлекает электронно-лучевое проволочное аддитивное производство (ЭЛАП, Wire-feed electron-beam additive manufacturing, EBAM). По сравнению с лазерным излучением, электронный луч обладает существенно более высокой энергетической плотностью, что делает отражение от металлической поверхности пренебрежимо малым. Проведение процесса в вакуумной камере исключает окисление. Кроме того, в ЭЛАП обычно применяют предварительный нагрев, который эффективно снижает остаточные напряжения, неизбежно возникающие при быстром охлаждении. И, что наиболее важно, использование магниевой проволоки вместо порошка практически полностью устраняет опасность взрыва магниевых продуктов [12].

Хорошо известно, что сплав AZ31 (система Mg-Al-Zn-Mn) является широко используемым промышленным материалом из-за его низкой стоимости, хороших литейных и механических свойств. Благодаря микролегированию элементов (Al, Zn), формуемость сплава AZ31 при комнатной температуре высока [13]. В частности, алюминий позволяет улучшить литейные свойства и повысить прочность магниевых сплавов, в то время как цинк оказывает благоприятное влияние на коррозионные и механические свойства магниевых сплавов, если его содержание составляет около 1 мас.%.

Таким образом, электронно-лучевое аддитивное производство представляет собой перспективное решение для создания крупногабаритных магниевых деталей. На сегодняшний день, систематических исследований магниевых сплавов, полученных методом ЭЛАП, ещё не проводилось. В особенности это касается технологических параметров (ток пучка, скорость подачи проволоки) с формируемой микроструктурой. Целью данной работы было выявить микроструктуру сплава системы Mg-Al-Zn-Mn, полученную с использованием электронно-лучевого проволочного аддитивного производства, до и после применения термообработок.

Исходными материалами служили проволока толщиной 2 мм и подложки толщиной 15 мм. Химический состав проволоки AZ31 представлен: Mg 95–97 мас.%, Al 2,5–3,5 мас.%, Zn 0,6–1,4мас.%, Mn <0,2 мас.% и другие элементы (Si, Cu, Ca, Fe, Ni) <0,1 мас.%. Электронно-лучевую печать образцов проводили с помощью сварочной установки, оснащенной механизмом подачи проволоки. Для печати ЭЛАП образцов была выбрана развертка электронного пучка в виде прямой линии, направленной поперек оси подачи проволоки и характеризующейся амплитудой 2,5 мм и частотой 500 Гц. Подвод тепла регулировался изменением тока электронного луча ток, который монотонно уменьшался с 15 мА до 10 мА при увеличении количества слоев. Скорость печати и форма сканирования электронного луча были одинаковыми для всех напечатанных слоев.

Режимы термообработок (таблица 1) напечатанного сплава были выбраны на основании литературных данных [14, 15]. Низкотемпературный отжиг (режим T1: 250 °C, 1 час) сплава AZ31 не приводит к заметному росту среднего размера зерна, но способствует повышению максимального удлинения (на разрыв) в 1,5 раза при снижении предела прочности в 1,2 раза. Высокотемпературный отжиг (режим T2: 450 °C, 1 час) способен кратно повысить коррозионную стойкость сплава AZ31, увеличить средний размера зерна (в несколько раз) при сохранении прочностных свойств.

Таблица 1

Режимы термообработки образцов сплава AZ31, полученного проволочным электронно-лучевым аддитивным производством

Сплав	Режим	Температура	Длительность	Вид закалки	Источник
AZ31	T1	250 °C	1 час (на воздухе)	на воздухе	[14]
	T2	450 °C	1 час (на воздухе)	на воздухе	[15]

Зеренную структуру образцов исследовали с использованием метода металлографии. Для этого образцы подвергались механической шлифовке на абразиве из карбида кремния и алмазной пасты для получения зеркальной поверхности и минимизации поверхностных дефектов. Травление проводили в растворе следующего состава: 10 мл HNO_3, 10 г пикриновой кислоты и 100 мл этанола в течении 20 секунд. Микроструктура и химический состав образцов, полученных методом ЭЛАП, были проанализированы с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega SBH3 (СЭМ), оснащенного системой энергодисперсионного анализа AZtec (Oxford Instruments, Великобритания). Просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ) проводили в режимах светлого, темного полей, микро- и нанодифракции на просвечивающем электронном микроскопе JEM 2100 (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Для этого вырезались пластинки размером 10х4х1мм^3 вдоль направления печати. Травление пучком ионов аргона с энергией до 6 кВ производили на установке EM 09100IS (JEOL, Япония).

На рисунке 1 представлены оптические изображения поверхности исходной проволоки, напечатанных и термообработанных образцов сплава AZ31. Средний размер зерна в проволоке составляет 20 мкм (рисунок 1а), тогда как после электронно-лучевой печати зерна имеют овальную форму и средний размер ~30 мкм (рисунок 1б). В результате применения термообработок в режимах Т1 и Т2 формируется частично рекристаллизованная структура (рисунок 1 в,г), характеризующаяся равноосными зернами со средними размерами ~36 и ~43 мкм, соответственно.

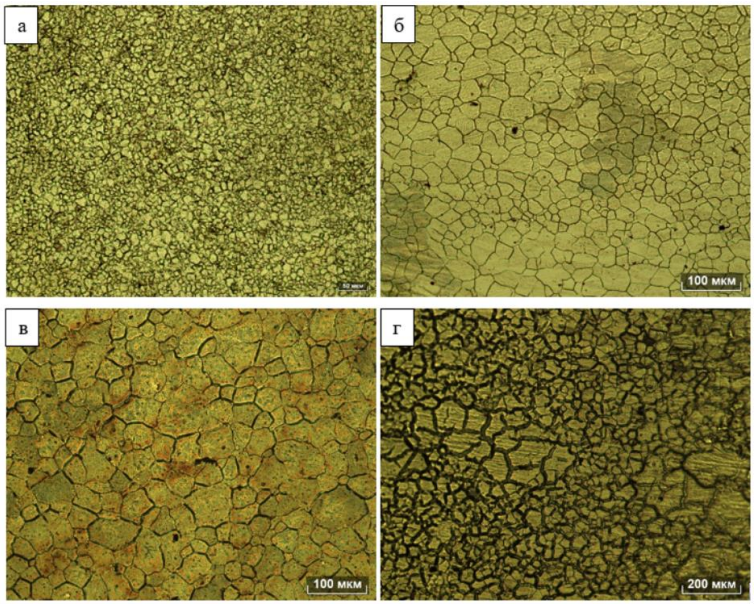


Рис. 1. Оптические изображения поверхности исходной проволоки сплава AZ31 (а), напечатанного сплава AZ31 до термообработки (б), напечатанного сплава AZ31 после термообработки в режиме Т1 (в), напечатанного сплава AZ31 после термообработки в режиме Т2 (г). Образцы были вырезаны в сечении (YZ)

СЭМ анализ морфологии поверхности исходной проволоки (рисунок 2а) и напечатанного образца (рисунок 9б) сплава AZ31 выявил наличие частиц вторых и примесных фаз, имеющих более светлый, по сравнению с матрицей, контраст.

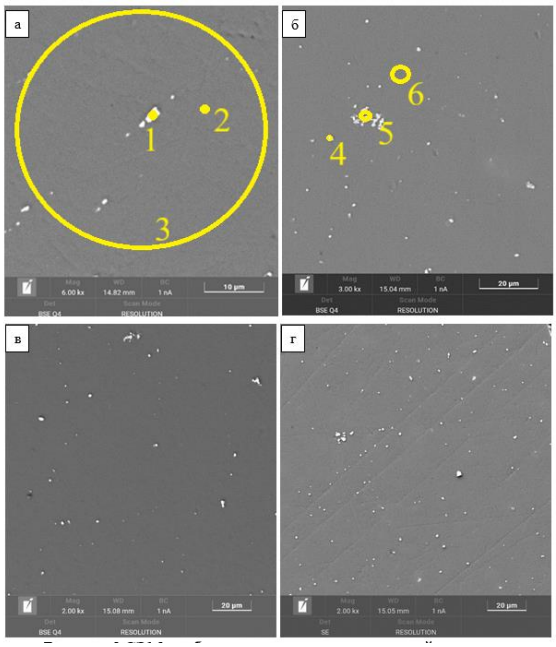


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности исходной проволоки сплава AZ31 (а), напечатанного сплава AZ31 до термообработки (б), напечатанного сплава AZ31 после термообработки в режиме Т1 (в), напечатанного сплава AZ31 после термообработки в режиме Т2 (г). Образцы были вырезаны в сечении (YZ)

Частицы имеют размеры до 2 мкм и распределены, преимущественно, внутри зерен. Установлено, что термообработки в режимах Т1 и Т2 (рисунок 2в,г) не способствуют растворению вторых фаз в объёме материала и не влияют на их дисперсность. Элементный состав матричных зерен, по данным СЭМ/ЭДС (таблица 2), описывается химической формулой Mg96Al3(Zn,Mn)1, согласующейся с составом прекурсоров (проволоки и подложки). Выявлено два типа частиц: обогащенные по Mn (до 45 ат.%) и Al (до 55 ат.%) примесные фазы системы Mn-Al, и частицы сложного хим. состава, в которых соотношение алюминия и магния составляет 6:1 при содержании примеси Mn до 26 ат.%.

Таблица 2

СЭМ/ЭДС анализ участков поверхности проволоки и напечатанного сплава AZ31, отмеченных на рисунке 2

Спектр	Mg (ат.%)	Al (ат.%)	Zn (ат.%)	Mn (ат.%)
1	11	63	<0,1	26
2	96	3	<0,2	<0,3
3	96	3	<0,2	<0,3
4	8	55	-	37
5	-	55	-	45
6	97	2	<0,3	<0,2

Для количественной оценки интенсивности испарения магния в процессе печати был проведен анализ содержания Al и Zn (Mg – баланс) по высоте напечатанного изделия сплава AZ31, изготовленного электронно-лучевым аддитивным производством (рисунок 3). Обнаружено, что доля алюминия монотонно возрастает с увеличением расстояния от подложки с 3 до 4 вес.%, а доля цинка остается неизменной (< 1 вес.%). Можно заключить, что имеет место селективное испарение магния в процессе электронно-лучевой печати, приводящее к обеднению магнием внутренних и наружных слоев изделия.

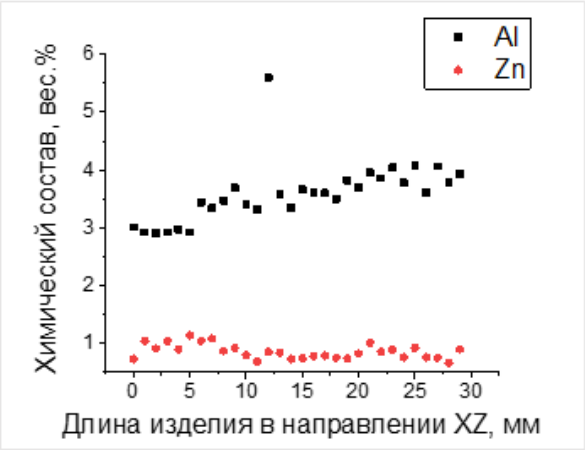
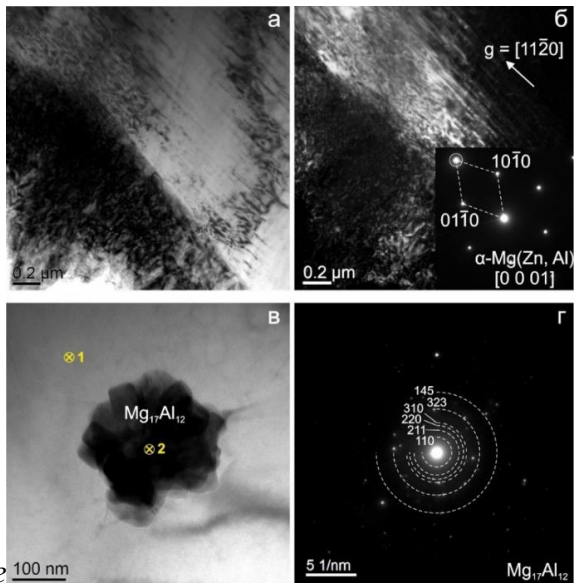


Рис. 3. Оценка содержания Al и Zn (Mg – баланс) по высоте напечатанного изделия сплава AZ31, изготовленного электронно-лучевым аддитивным производством

Результаты исследований методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) напечатанного сплава AZ31 приведены на рисунках 4–6. В структуре сплава преобладают полосовые дислокационные структуры в матричных α-Mg(Al, Zn) зернах, дающие деформационный контраст в рефлексе <11–20> (рисунок 4а,б), а также дислокационные скопления, сгруппированные в сетки дислокаций (рисунок 6а,б). Вблизи границ α-зерен фиксируются узкие экстинкционные контуры (рисунок 4б, рисунок 6б), что говорит о высоких градиентах механических напряжений, созданных дислокационными ансамблями. Установлено, что после печати в матричных зернах сплава AZ31 сформировалась дефектная подсистема, представленная дислокациями, принадлежащими системе скольжения {1011} <1120>. Кроме этого, внутри зерен обнаружены частицы вторичной фазы Mg17Al12 (рисунок 4в,г), сгруппированные в конгломераты, и частицы примесной фазы Al8Mn5 (рисунок 5а,б), согласно расшифровке микродифракционных картин. Типичные размеры частиц Mg17Al12 и Al8Mn5 составляет 200 нм и 1.5 мкм, соответственно.



шг

Рис. 4. Светлопольные (а, в) и темнопольное (б) ПЭМ изображения структуры сплава AZ31, полученного проволочным электронно-лучевым аддитивным производством. Элементный анализ методом ЭДС проводился в областях (1) и (2), отмеченных на (в). Темнопольное изображение (б) было получено в рефлексе g = [11–20]. Микродифракционная картина, принадлежащая фазе β-Mg17Al12, представлена на (г)

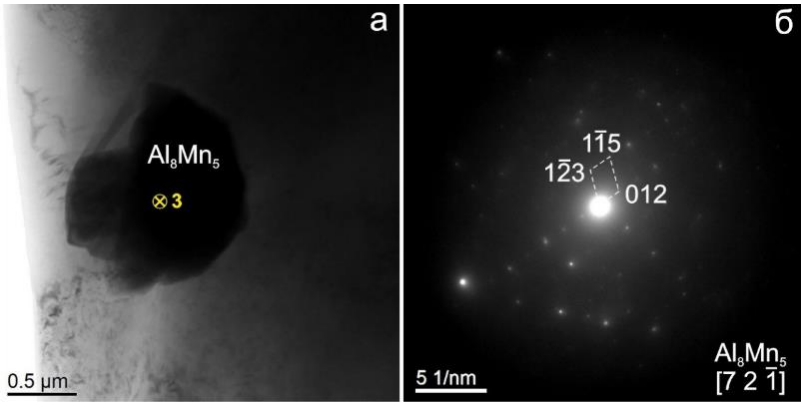


Рис. 5. Светлопольное ПЭМ изображение (а) частицы примесной фазы Al8Mn5 и её микродифракционная картина (б) в сплаве AZ31, полученном проволочным электронно-лучевым аддитивным производством. Элементный анализ методом ЭДС проводился в области (3), отмеченной на (а)

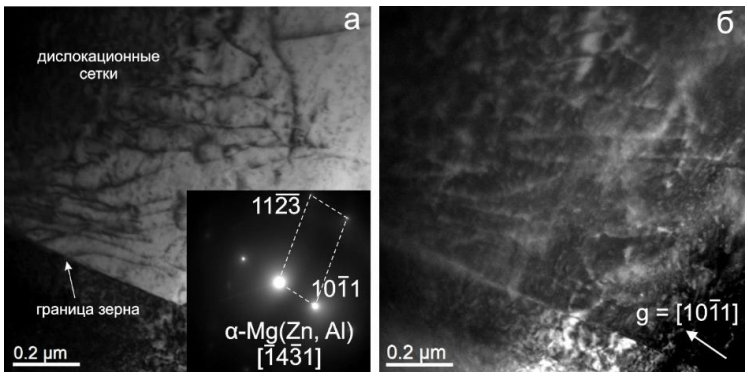


Рис. 6. Светлопольное (а) и темнопольное (б) ПЭМ изображение дефектной структуры сплава AZ31, полученного проволочным электронно-лучевым аддитивным производством

Количественные ЭДС/ПЭМ результаты (таблица 3) свидетельствуют о том, что матричные зерна содержат преимущественно магний (до 98 ат.%), а также алюминий (до 2 ат.%) и следовые концентрации цинка. В частицах второй фазы соотношение Mg:Al составляет 3:1, а в примесных фазах преобладает примесь марганца (до 16 ат.%) (таблица 3).

Таблица 3

Количественные результаты ЭДС/ПЭМ анализа в областях (1)-(3), отмеченных на рисунках 4 и 5, сплава AZ31, полученного проволочным электронно-лучевым аддитивным производством

Область анализа	Mg (ат.%)	Al (ат.%)	Zn (ат.%)	Mn (ат.%)
(1) Матричное зерно	~98	~1,5	<0,5	-
(2) Частица второй фазы	~74	~25	<1,0	-
(3) Частица примесной фазы	~62,5	~21	<0,5	~16

Проведена аттестация микроструктуры, химического и фазового составов образцов сплава AZ31 методами оптической металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Установлено, что микроструктура сплава, изготовленного ЭЛАП, представлена матричной фазой на основе Mg, примесной фазой Al_8Mn_5 и интерметаллической фазой $Mg_{17}Al_{12}$. Зерна матричной фазы имеют овальную форму со средним размером ~30 мкм. После термообработок формируется рекристаллизованная структура, характеризующаяся равноосными зернами со средними размерами до ~43 мкм. Показано, что термообработки сплава AZ31 не способствуют растворению вторых фаз в объёме ма териала и не влияют на их дисперсность.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00912, https://rscf.ru/project/25-29-00912/.

Список литературы

1. Pollock T. M. Weight loss with magnesium alloys / T. M. Pollock // Science. – 2010, – Vol. 328, № 5981. – P. 986–987.

2. Li X. Direct conversion of CO_2 to graphene via vapor–liquid reaction for magnesium matrix composites with structural and functional properties / X. Li, X. Wang, X. Hu, [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. – 2023. – Vol. 11, № 4. – P. 1206–1212.

3. Weiler J. P. Exploring the concept of castability in magnesium die-casting alloys / J. P. Weiler // Journal of Magnesium and Alloys. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 102–111.

4. Shi H. Improving the Young's modulus of Mg via alloying and compositing – a short review / H. Shi, C. Xu, X. Hu, [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – Vol. 10, № 8. – P. 2009–2024.

5. Herzog D. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392.

6. DebRoy T. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties / T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, [et al.] // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.

7. Esmaily M. A detailed microstructural and corrosion analysis of magnesium alloy WE43 manufactured by selective laser melting / M. Esmaily, Z. Zeng, A. N. Mortazavi, [et al.] // Additive Manufacturing. – 2020, – Vol. 35. – P. 101321.

8. Utyaganova V. The effect of heat treatment of a biodegradable magnesium-based alloy produced by additive manufacturing on the product performance / V. Utyaganova, V. Semin, N. Savchenko, [et al.] // Materials Characterization. – 2025. – P. 115457.

9. Wu B. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139.

10, Liu S. Influence of laser process parameters on the densification, microstructure, and mechanical properties of a selective laser melted AZ61 magnesium alloy / S. Liu, W. Yang, X. Shi, B. Li, [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Vol. 808. – P. 151160,

11. Wang P. Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: processing, microstructure, and mechanical behavior / P. Wang, H. Zhang, H. Zhu, Q. Li, M. Feng // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 288. – P. 116895.

12. Ding D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 81, № 1. – P. 465–481.

13. Wu B. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement / B. Wu, Z. Pan, D. Ding, [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 35. – P. 127–139.

14. Kong T. Tailoring strength-ductility balance of caliber-rolled AZ31 Mg alloy through subsequent annealing / T. Kong, B. J. Kwak, J. Kim [et al.] // Journal of Magnesium and Alloys. – 2020, – Vol. 8, № 1. – P. 163–171.

15. Chen H. Effects of annealing treatment on the microstructure and corrosion behavior of hot rolled AZ31 Mg alloy / H. Chen, J. Tang, W. Gong [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 4800–4812.

Панина Е.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
panina.lena2003@yandex.ru
Типалин С.А.
к.т.н., профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
tsa_mami@mail.ru

ОЦЕНКА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ДЕТАЛИ «КОЖУХ» В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ QFORM

Аннотация. В статье рассматривается применение численного моделирования для оценки результатов процесса вытяжки осесимметричной детали «Кожух» из алюминиевого сплава АМг6. Проведен анализ результатов для двух основных формообразующих

операций вытяжки. Особое внимание уделяется распределению пластической деформации, интенсивности напряжений, утолщению и утонению стенок, диаграммам предельного формоизменения. Моделирование выполнено с использованием программного комплекса Qform. По результатам расчетов выявлено, что максимальные значения исследуемых характеристик не превышают допустимые пределы для данного материала. Полученные результаты подтверждают работоспособность выбранной технологии и целесообразность применения Qform для проектирования и исследования операций листовой штамповки.

Ключевые слова: вытяжка, листовая штамповка, алюминиевый сплав, Qform, формоизменение, моделирование, АМг6.

Panina E.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
panina.lena2003@yandex.ru
Tipalin S.A.
Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Materials Processing by Pressure and Additive Technologies
Moscow Polytechnic University,
Russia, Moscow
tsa_mami@mail.ru

ASSESSMENT OF ALUMINUM SHEET BLANK FORMING DURING DEEP DRAWING OF THE «CASING» PART USING THE QFORM SOFTWARE PACKAGE

Abstract. The article considers the application of numerical simulation to evaluate the results of the deep drawing process of the axisymmetric «Casing» part made of AMg6 aluminum alloy. The results obtained for two main forming operations of deep drawing are analyzed. Particular attention is paid to the distribution of plastic strain, stress intensity, wall thickening and thinning, as well as forming limit diagrams. The simulation was performed using the QForm software package. According to the calculation results, the maximum values of the analyzed parameters do not exceed the allowable limits for the material under consideration. The obtained results confirm the feasibility of the selected technological process and the effectiveness of using QForm for the design and analysis of sheet metal forming operations.

Keywords: deep drawing, sheet metal forming, aluminum alloy, QForm, forming, numerical simulation, AMg6.

Наиболее эффективным методом получения тонкостенных осесимметричных деталей является вытяжка листовых заготовок. Данный способ обработки давлением широко применяется в машиностроении, авиационно-ракетной отрасли, где к изделиям предъявляются высокие требования к точности, качеству поверхности и массе. Для деталей из алюминиевых сплавов, в частности АМг6, анализ процесса вытяжки особенно важен, так как при формообразовании возможно возникновение локальных утонений и дефектов. Использование программного комплекса QForm, позволяет оценивать

распределение напряжений, пластических деформаций, изменение толщины заготовки еще на этапе проектирования.

В данной статье рассматриваются результаты моделирования двух операций вытяжки детали «Кожух» из алюминиевого сплава АМг6: производится оценка напряженно-деформированного состояния, распределения толщин, пластической деформации.

Целью работы является подтверждение работоспособности выбранной технологии изготовления детали и оценка возможности получения изделий без разрушений и дефектов. Объектом исследования является тонкостенная осесимметричная деталь «кожух» из алюминиевого сплава АМг6 (рисунок 1).

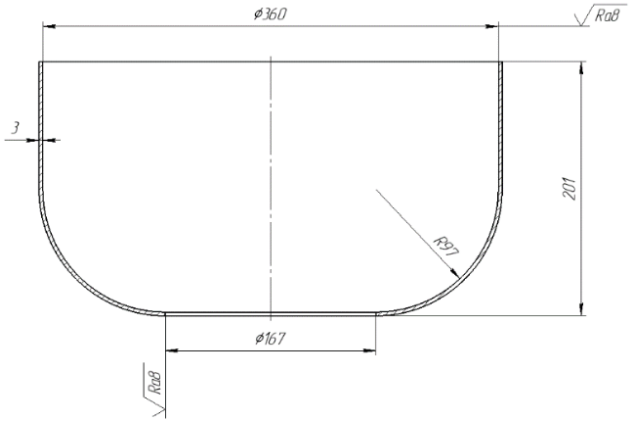


Рис. 1. Эскиз детали «Кожух»

Технологический процесс изготовления включает несколько последовательных операций: вытяжка, обрезка, окончательная вытяжка, пробивка. Вытяжка производится в штамповой оснастке (рисунок 2).

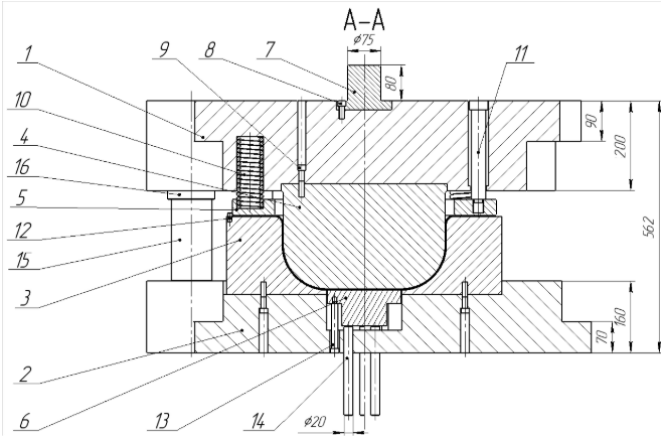


Рис. 2. Штамп для вытяжки детали «Кожух»:
1 – плита верхняя; 2 – плита нижняя; 3 – матрица; 4 – пуансон; 5 – прижим; 6 – выталкиватель; 7 – хвостовик; 8 – винт М12–6g×30; 9 – винт М12–6g×60; 10 – пружина; 11 – винт; 12 – упор; 13 – винт; 14 – толкатель; 15 – колонка направляющая; 16 – втулка направляющая

Для осуществления моделирования в программе QForm геометрия инструмента была принята на основе чертежа штампа в упрощенном виде, сохраняя рабочие элементы: неподвижная матрица 1, пуансон 2, движущегося и прижим 3 (рисунок 3).

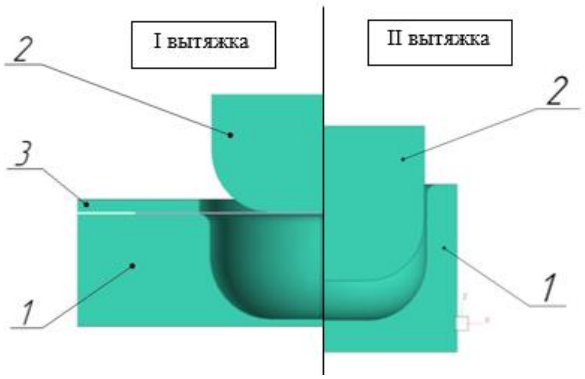


Рис. 3. Оснастка для вытяжки

Для оценки эффективности технологического процесса было выполнено моделирование двух основных операций вытяжки. При моделировании анализировались интенсивность напряжений, пластическая деформация, распределение толщины, строилась диаграмма предельного формоизменения, было определено усилие операции.

По результатам моделирования интенсивность напряжений при первой вытяжке достигло 156 МПа (расположено в зоне перехода стенки в фланец), при окончательной– возросло в 1,4 раза до 212 МПа (расположено на краю стенки заготовки) (рисунок 4). Это объясняется тем, что на втором переходе уже имеет сформированную геометрию и дополнительно подвергается перераспределению деформаций. Несмотря на увеличение интенсивности напряжений, максимальное значение остается ниже сопротивления разрыву АМг6, что показывает отсутствие разрушений.

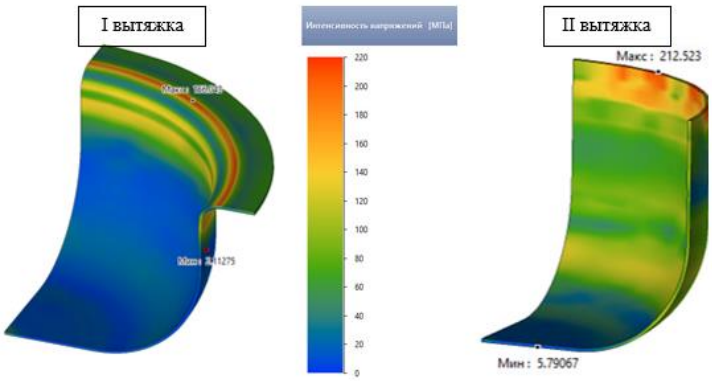


Рис. 4. Интенсивность напряжений для вытяжки

Значение пластической деформации 0,67 для первой вытяжки, расположено в зоне перехода стенки в фланец, а величина деформации 0,74 для

окончательной вытяжки, находится в зоне переходного радиуса из торовой части в вертикальную стенку) (рисунок 5). Изменение пластической деформации в 1,1 раз обусловлено переходом радиусов в последующие цилиндрические участки стенки, там, где металл испытывает наиболее интенсивное растяжение и свертывание.

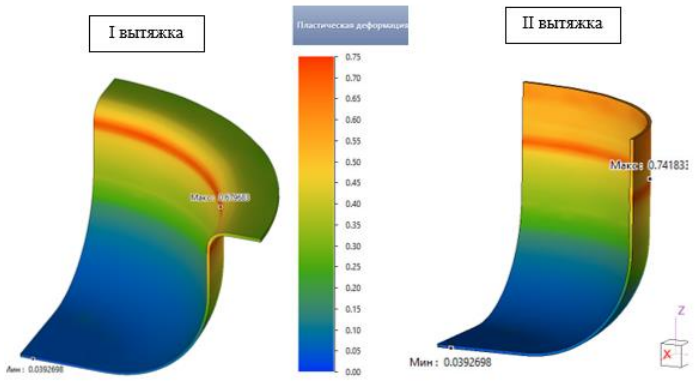


Рис. 5. Пластическая деформация для вытяжки

Распределение толщин при первой вытяжке следующее – в дне наблюдается утонение на 10% от начальной толщины материала до 2,7 мм, утолщение на крае фланца на 15% до 3,43 мм. При окончательной вытяжке минимальное значение толщины в зоне дна не меняется, а максимальное увеличивается на 8% от начальной толщины материала до значения 3,29 мм (рисунок 6). Полученные значения утонения и утолщения не являются критическими для данного материала и не указывают на появление деформаций.

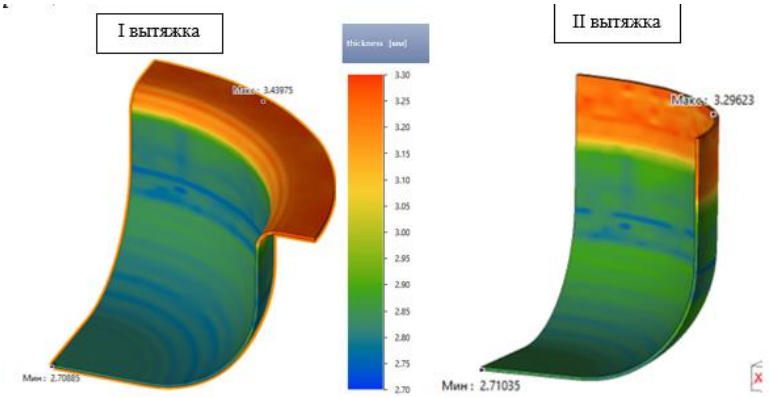


Рис. 6. Карта толщин для вытяжки

Для каждой операции были построены диаграммы предельного формоизменения (рисунки 7, 8). Анализ данных кривых показывает, что все расчетные точки располагаются ниже предельных значений. Следовательно, есть условия шейкообразования и разрыва не достигаются. Это подтвержда-

ется распределением по зонам: доля элементов в критических областях составляет 0%, а основные значения приходятся на рабочие области (синяя, зелёная и фиолетовая зоны).

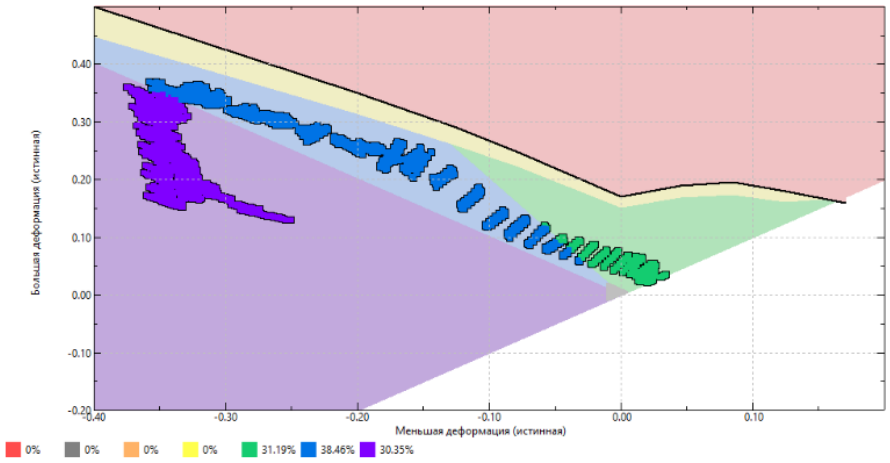


Рис. 7. Диаграмма предельного формоизменения для первой вытяжки

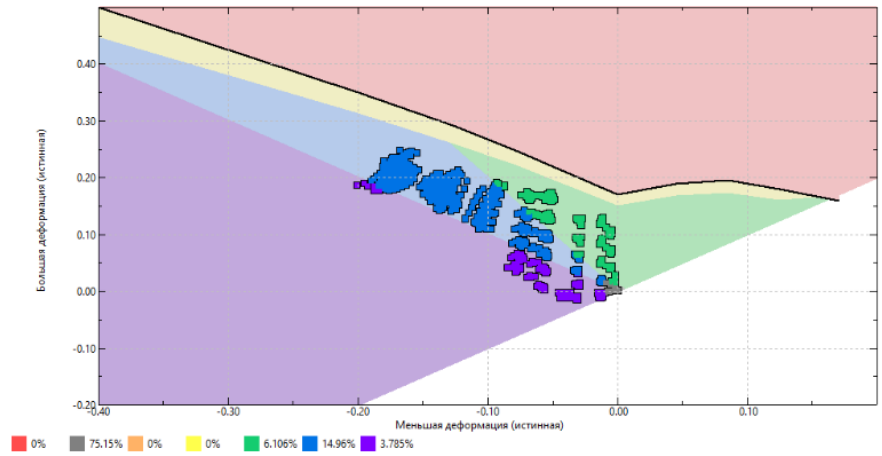


Рис. 8. Диаграмма предельного формоизменения для окончательной вытяжки

Анализ всех результатов моделирования показал, что выбранная технология изготовления обеспечивает устойчивое формоизменение заготовки на всех этапах. Полученные значения пластической деформации, интенсивности напряжений и распределения толщин находятся в допустимых пределах для материала АМг6.

Таким образом, численное моделирование подтвердило работоспособность разработанной технологии изготовления детали «Кожух» и показало целесообразность применения программного комплекса Qform на этапе проектирования и оценки процессов для листовой штамповки.

Список литературы

1. Кухарь В. Д., Бойко О. А. Исследование процесса комбинированной вытяжки детали «Стакан» с помощью программы QForm 2D/3D // Известия ТулГУ. Технические

науки. 2012. №8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-kombinirovannoy-vytyazhki-detali-stakan-s-pomoschyu-programmy-qform-2d-3d

2. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.,

3. Феоктистов С.И., Андрианов И.К. Построение диаграммы предельных деформаций формоизменения листовых заготовок из авиационных алюминиевых сплавов. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2023;23(1):7-16. https://doi.org/10, 23947/2687-1653-2023-23-1-7-16

4. Anggono A. D. Investigating Thinning and Wrinkling in Deep Drawing Processes: A Comparative Analysis of Two Punch Designs on 2.5 mm Aluminum Sheets / A. D. Anggono, Masyrukan, A. Hariyanto, F. Royani, F. Firmansyah, A. A. Crismansyah. – Текст : электронный // International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements. – 2024. – Vol. 12, № 4. – P. 403–410, – DOI: 10, 18280/ijcmem.120409. – URL: https://iieta.org/journals/ijcmem/paper/10, 18280/ijcmem.120409

Барбасов Н.В.
аспирант
ПАО «НПО «Алмаз»
Россия, Москва
okb.lemz.8otdel@gskb.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ МАССЫ АППАРАТУРЫ, ЭКРАНИРОВАННОЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы использования магниевых сплавов в качестве конструкционного материала для аппаратуры, требующей защиты от внешних электрических полей. Проведен сравнительный анализ магниевых сплавов с традиционно применяемыми медью и алюминиевыми сплавами с точки зрения минимизации массы и повышения ЭЭ эффективности экранирования. Показано, что благодаря низкой плотности (в 1,5 раза легче алюминия и в 4 раза легче меди) магниевые сплавы позволяют значительно снизить массу экранированной аппаратуры, или повысить эффективности экранирования без увеличения массы. Показаны магниевые сплавы, которые лучше других позволяют сократить массу изделия без ухудшения экранирующих свойств. В статье приведен рейтинг магниевых сплавов, позволяющих добиться наибольшей эффективности экранирования при равных массах. Приведены сравнения эффективности экранирования магниевых сплавов с материалами, традиционно используемыми для экранирования, а именно с медью марки М3 и алюминиевым сплавом АД31 при условии равенства масс. Продемонстрирована важность учета не только толщины экрана, но и его массы. Показано, что сокращение массы изделия путем подбора материала, позволяющего обеспечить защиту от электрического поля минимальной толщиной, в некоторых случаях, может быть не эффективно.

Ключевые слова: магниевые сплавы, экранирование электрического поля, минимизация массы, радиоэлектронная аппаратура, электромагнитная совместимость (ЭМС).

Barbasov N.V.
Postgraduate Student
PJSC NPO Almaz
Russia, Moscow
okb.lemz.8otdel@gskb.ru

PROSPECTS FOR USING MAGNESIUM ALLOYS TO MINIMIZE THE MASS OF EQUIPMENT SHIELDED AGAINST ELECTRIC FIELD EFFECTS

Abstract. The article examines the prospects of using magnesium alloys as structural materials for equipment requiring protection against external electric fields. A comparative analysis of magnesium alloys versus traditionally used copper and aluminum alloys is conducted, focusing on minimizing weight and enhancing electromagnetic shielding effectiveness. It has been demonstrated that, due to their low density (1.5 times lighter than aluminum and 4 times lighter than copper), magnesium alloys enable a significant reduction in the weight of shielded equipment or an increase in shielding effectiveness without increasing weight. Magnesium alloys that are particularly effective at reducing product weight without compromising shielding properties are identified. The article presents a ranking of magnesium alloys that offer the highest shielding efficiency for a given mass. It compares the shielding efficiency of these magnesium alloys with that of materials traditionally used for shielding–specifically, M3 grade copper and AD31 aluminum alloy–under conditions of equal mass. The study demonstrates the importance of considering not only the shield's thickness but also its mass. It is shown that reducing the product's mass by selecting a material that provides electric field protection with minimal thickness may, in some cases, prove ineffective.

Keywords: magnesium alloys, electric field shielding, mass minimization, electronic equipment, electromagnetic compatibility (EMC).

Обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры традиционно достигается применением металлических экранов что существенно увеличивает массу конструкции и усложняет требования к носителям, особенно в авиакосмической и мобильной технике [1]. Одним из путей снижения массы экрана без потери защитных свойств является изменение материала экрана. Перспективным материалом для экранирования аппаратуры можно выделить магниевые сплавов, поскольку они обладают уникальным сочетанием низкой плотности (в среднем в 1,5 раза легче алюминиевых сплавов и в 4 раза легче меди) и достаточной удельной электрической проводимостью [2–7]. Проведем численное сравнение эффективностей экранирования магниевых сплавов с материалами, традиционно используемыми для экранирования – меди М3 и алюминиевого сплава АД31. Данное сравнение позволит доказать целесообразность применения магниевых сплавов в качестве экранов.

В работе рассматривается эффективность экранирования (ЭЭ) электрического поля, которая в общем виде описывается суммой трёх составляющих:

$$S = R + A + B, \quad (1)$$

где R – затухание за счёт отражения электрического поля на границе раздела «среда–экран», дБ; A – затухание, обусловленное тепловыми потерями от вихревых токов в материале экрана, дБ; B – вклад внутренних переотражений в экране (многолучевая интерференция), дБ.

Составляющие R, A, B рассчитываются по приведённым ниже зависимостям, учитывающим волновые свойства материала и среды [1, 8–11]:

$$R = 20 \cdot \lg \left| \frac{(Z_д + Z_м)^2}{4 \cdot Z_д \cdot Z_м} \right| \quad (2)$$

$$A = 8{,}69 \cdot \frac{t \cdot \sqrt{\mu \cdot \omega \cdot \sigma}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$B = 20 \cdot \lg \left(1 - \frac{(Z_д - Z_м)^2}{(Z_д + Z_м)^2} \cdot e^{\frac{-2 \cdot t \cdot \sqrt{\mu \cdot \omega \cdot \sigma}}{\sqrt{2}}} \right) \quad (2)$$

$$Z_{ДЭ} = \frac{1}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot r}, \quad (2)$$

где $Z_д$ – волновое сопротивление окружающей среды (для ближней зоны электрического поля), Ом; $Z_м$ – волновое сопротивление материала экрана, Ом; t – толщина экрана, м; μ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; ω – угловая частота поля, Гц; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды.

Для фиксированной массы экрана m и известной площади S толщину можно определить, как [12]:

$$t = \frac{m}{\rho \cdot S}. \quad (2)$$

Сравнение проводилось для экрана площадью 10 мм^2 и массой 0,1 кг, расположенного на расстоянии 10 мм от источника электрического поля. Толщина экрана для каждого материала вычислялась по формуле (6). Расчёт ЭЭ выполнен в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц.

Как следует из источников [1, 10, 11] и соотношений (1–5), в диапазоне частот выше 1 МГц ЭЭ практически полностью определяется поглощающей способностью материала. Основной вклад здесь вносит поглощение, обусловленное тепловыми потерями на вихревые токи в металле (слагаемое A в формуле (1)). В данных условиях ЭЭ начинает зависеть от частоты по корневому закону: её рост пропорционален квадратному корню из частоты. Это означает, что повышение частоты на декаду приводит к увеличению ЭЭ более чем втрое. В свою очередь, согласно проведенным ранее исследованиям [1, 10 11], напряжённость поля за экраном снижается дополнительно как минимум на три порядка. Однако на практике подобные значения ЭЭ избыточны. Оправданным с инженерной точки зрения представляется рассмотрение режимов экранирования в области частот от 1 МГц и ниже [1, 10 11]. При этом различия в ЭЭ между разными материалами на частотах свыше 1 МГц становятся ещё более выраженными. Следовательно, ранжированный

ряд материалов по убыванию ЭЭ, установленный для частоты 1 МГц, сохраняет свою силу и для более высокочастотной области.

В табл. 1 приведены физические свойства и результаты расчета рассмотренных наиболее магниевых сплавов. Помимо магниевых сплавов, для сравнения были рассчитаны ЭЭ для алюминиевого сплава АД31 и меди М3 (см табл. 2). Данные о физических свойствах материалов взяты из источников [2–7].

Таблица 1

ЭЭ магниевых сплавов в электрическом поле, для листов толщиной 4 мм, и листов массой 0,1 кг

Марка	№	□, кг/м³	□, МСм/м	f, Гц	t, мм	ЭЭ при m = 0,1 кг, дБ
МА1	3	1760	16,39	10^0	5,68	141,8805
				10^4		162,4072
				10^6		500,2484
МА11	4	1800	16,13	10^0	5,56	141,5462
				10^4		161,1443
				10^6		488,2475
МА14	5	1800	17,86	10^0	5,56	142,4315
				10^4		163,6028
				10^6		508,8455
МА15	6	1830	15,38	10^0	5,46	140,9888
				10^4		159,4124
				10^6		472,7941
МА19	7	1880	16,39	10^0	5,32	141,3072
				10^4		159,8686
				10^6		474,8697
МА2	8	1780	8,33	10^0	5,62	135,9021
				10^4		147,7218
				10^6		379,9761
МА2-1	9	1790	8,33	10^0	5,59	135,8534
				10^4		147,5647
				10^6		378,4103
МА5	10	1800	7,69	10^0	5,56	135,1105
				10^4		145,972
				10^6		365,6551
МА8	11	1780	19,61	10^0	5,62	143,3408
				10^4		166,4287
				10^6		533,4471

Таблица 2

ЭЭ меди М3 и алюминиевого сплава АД31 в электрическом поле, для листов толщиной 4 мм, и листов массой 0,1 кг

Марка	№	□, кг/м³	□, МСм/м	f, Гц	t, мм	ЭЭ при m = 0,1 кг, дБ
М3	1	8940	34,25	10^0	1,12	138,4613
				10^4		142,1751
				10^6		252,9165
АД31	2	2710	56,18	10^0	3,69	144,5326
				10^4		163,175
				10^6		479,1256

Все исследуемые зависимости (рис., кривые 1–11) подчиняются экспоненциальному закону с характерным выходом на постоянное значение в области низких частот (до 1 кГц), что согласуется с классическими представлениями об экранировании [1] и подтверждает корректность выполненных расчётов.

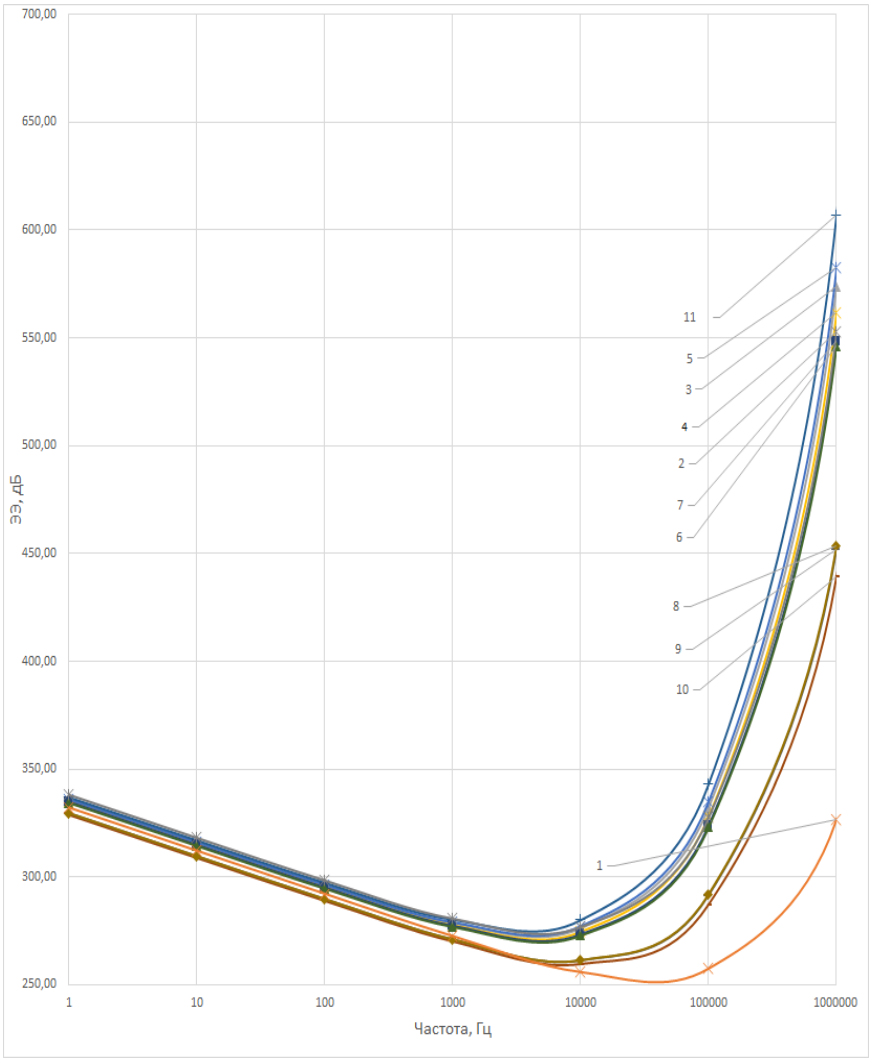


Рис. Рассчитанные значения эффективности экранирования электрического поля для исследуемых материалов при условии равных масс

Для удобства рассмотрения результатов исследования разделим рассматриваемый частотный диапазон на нижний (до 1 кГц) и верхний (свыше 1 кГц)

Нижний частотный диапазон:

- Наибольшую ЭЭ демонстрирует алюминиевый сплав АД31 (кривая 2).
- Разница между остальными материалами не превышает 10 дБ.
- Наименьшую ЭЭ в этом диапазоне показывают сплавы МА2, МА2-1, МА5 (кривые 8–10).
- Медь М3 (кривая 1) обладает ЭЭ больше, чем сплавы МА2, МА2-1, МА5 (кривые 8–10), но меньше, чем остальные рассмотренные сплавы.

Верхний частотный диапазон:

- Максимальной ЭЭ обладает сплав МА8 (кривая 11).
- Группа сплавов АД0, МА1, МА11, МА14, МА15, МА19 (кривые 2–7) обеспечивает более высокую ЭЭ, чем медь.
- Наилучший результат в этой группе у МА14, наихудший – у МА15.
- Сплавы МА2, МА2-1, МА5 (кривые 8–10) показывают более низкую ЭЭ, но всё ещё выше, чем у меди.
- Медь М3 на частоте 1 МГц имеет ЭЭ почти в два раза ниже, чем у МА8.

Для большей наглядности, приведем перечень рассмотренных материалов при частотах 0,1 кГц и 1 МГц по убыванию ЭЭ (см. табл. 3).

Таблица 3

Рейтинг по ЭЭ в электрическом поле, для экранов массой 0,1 кг, при частотах 0,1 кГц и 1МГц

Место	Частота	
	0,1 кГц	1 МГц
1	МА8	МА8
2	МА14	МА14
3	МА1	МА1
4	МА11	МА11
5	АД31	АД31
6	МА19	МА19
7	МА15	МА15
8	МА2	М3
9	МА21	МА2
10	МА5	МА21
11	М3	МА5

Следует отметить, что согласно выражениям (1–5) и работам [1, 10 11], при условии равной толщины, большей ЭЭ будет обладать лист из материла,

чья электропроводность и магнитная проницаемость будет выше. Т.к. в исследовании приведены не магнитные материалы, то большей ЭЭ будет обладать материал с наибольшей электропроводностью. По табл. 1 таким материалом является медь М3. Однако, в приведенном исследовании показано, что медь обладает по сравнению с сплавами магния в среднем худшей ЭЭ при равной массе. Это связано, с тем, что медь обладает значительной плотностью, из-за этого при равной массе данный материал обладает достаточно малой толщиной. В связи с этим можно сделать вывод, что при подборе материала экрана важен учета не только его толщины, но и массы. Так же можно отметить, что сокращение массы изделия путем подбора материала, позволяющего обеспечить защиту от электрического поля минимальной толщиной, в некоторых случаях, может быть не эффективно (как в приведенном исследовании с медью М3).

В работе исследована эффективность экранирования электрического поля магниевыми сплавами при равной массе экрана в диапазоне частот от 1 Гц до 1 МГц. Установлено, следующее:

1. Сплавы МА1, МА11, МА14, МА15, МА19, МА8 во всём частотном диапазоне обладают более высокой ЭЭ, чем медь М3.
2. Сплавы МА2, МА2-1, МА5 превосходят медь по ЭЭ на частотах выше 1 кГц.
3. На частотах свыше 1 кГц сплавы МА1, МА11, МА14, МА8 показывают ЭЭ выше, чем алюминиевый сплав АД31.
4. При выборе материала для экрана важно учитывать, что для минимизации толщины и для минимизации массы могут быть эффективны абсолютно разные материалы.

Полученные результаты позволяют утверждать, что магниевые сплавы являются перспективной заменой традиционным материалам экранов: либо для снижения массы при сохранении требуемой ЭЭ, либо для повышения ЭЭ без увеличения массы.

Список литературы

1. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. – Томск: ТУСУР, 2012. – 228 с.
2. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Тенденции развития литейных магниевых сплавов с повышенной температурой воспламенения // Труды ВИАМ. – 2021. – № 2(96). – С. 3–9.
3. Уридия З.П., Токарев М.С., Леонов А.А., Трофимов Н.В. Тенденции развития современных технологий изготовления и методы усовершенствования свойств поверхности магниевых сплавов // Труды ВИАМ. – 2022. – № 11(117). – С. 37–47.
4. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А. О современных тенденциях развития магниевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2016. – № 3. – С. 94–105.
5. Металлический портал: марки металлов и сплавов. – URL: https://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov (дата обращения 15.03.26).
6. Справочник Acrossteel. – URL: https://acrossteel.ru/directory/choose_type_all.html (дата обращения 16.03.26).

7. Петров А.А., Сперанский К.А. Магниевые сплавы: перспективные отрасли применения, преимущества и недостатки. Часть 2 // Труды ВИАМ. – 2021. – № 11(105). – С. 12–24.

8. Годин А.С., Мацаян М.С., Климов К.Н. Численное электродинамическое исследование внешнего куба Сестрорецкого // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61, № 5. – С. 401.

9. Климов К.Н. Электродинамическое моделирование волноводной приёмной антенны с рабочей полосой частот октава // Вестник воздушно-космической обороны. – 2021. – С. 61–68.

10. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. – М.: Радио и связь, 1989 – 224с.

11. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: «ТМЛ-Пресс», 2007. – 256с.

12. Кузнецов С.И., Рогозин К.И. Краткий курс физики. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 215 с.

Жданович О.А.
директор департамента образования, науки и новых технологий
передовой инженерной школы технологического лидерства «FDR»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
o.zhdanovich@yandex.ru
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

Аннотация. В статье рассматривается проблема недостаточной износостойкости и коррозионной стойкости титановых сплавов, широко применяемых в авиастроении, ракетной технике, судостроении и химическом машиностроении. Описаны традиционные методы поверхностного упрочнения, такие как азотирование, и их ограничения: низкая производительность, высокая энергозатратность и малая глубина упрочнённого слоя. Предложен инновационный метод поверхностного упрочнения титанового сплава ВТ6 с использованием плазменной струи, генерируемой сжатой электрической дугой в атмосфере азота. Метод обеспечивает быстрый локальный нагрев и насыщение поверхностного слоя азотом, что приводит к формированию многослойной структуры с высокой микротвердостью (до 9–12 ГПа) и глубиной упрочнённого слоя до 1,5 мм. Исследованы параметры процесса, микроструктура, распределение микротвёрдости, износостойкость и коррозионная стойкость упрочнённых образцов. Экспериментально установлено, что оптимальные режимы обработки позволяют повысить микротвёрдость в 2,3 раза, износостойкость – на 50%, а также снизить коррозионные потери. Подчёркивается перспективность применения концентрированных источников энергии для химико-термического упрочнения титановых сплавов.

Ключевые слова: титановый сплав ВТ6, поверхностное упрочнение, плазменная обработка, микротвёрдость, износостойкость, коррозионная стойкость, структурные превращения, нитрид титана.

Zhdanovich O.A.
Director of the Department of Education, science and new technologies, advanced engineering
of the School of Technological Leadership «FDR»
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
anna1-2016@mail.ru
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

PLASMA SURFACE HARDENING OF TITANIUM ALLOY VT6

Abstract. The article discusses the problem of insufficient wear resistance and corrosion resistance of titanium alloys, which are widely used in aircraft construction, rocket technology, shipbuilding and chemical engineering. Traditional surface hardening methods, such as nitriding, and their limitations are described: low productivity, high energy consumption, and shallow hardened depth. An innovative method of surface hardening of titanium alloy VT6 using a plasma jet generated by a compressed electric arc in a nitrogen atmosphere is proposed. The method provides rapid local heating and saturation of the surface layer with nitrogen, which leads to the formation of a multilayer structure with high microhardness (up to 9–12 GPa) and a depth of the hardened layer up to 1.5 mm. It has been experimentally established that optimal processing modes can increase microhardness by 2.3 times, wear resistance by 50%, and reduce corrosion losses. The prospects for the use of concentrated energy sources for chemical-thermal hardening of titanium alloys are emphasized.

Keywords: Titanium alloy BT6, surface hardening, plasma treatment, microhardness, wear resistance, corrosion resistance, structural transformations, titanium nitride.

Титан причисляется к числу наиболее востребованных материалов в различных промышленных сферах. Его сплавы находят применение в условиях, где критически важны высокое удельное сопротивление и устойчивость к коррозии, что особенно актуально для авиастроения, ракетной техники, судостроения и химического машиностроения. Тем не менее, несмотря на выдающиеся механические и физико-химические свойства, титановые материалы обладают недостаточной износостойкостью и антифрикционными характеристиками, что выражается в склонности к прихватам и задирам, а также низким уровнем защиты от высокотемпературной газовой коррозии [1; 2].

Сегодня для повышения износостойкости титановых сплавов широко задействованы разнообразные методы химико-термической обработки.

Среди них особое внимание привлекает перспективная технология поверхностного азотирования, осуществляемая в атмосфере чистого азота либо его смеси с аргоном в температурном диапазоне от 500 до 950 °С.

Процесс азотирования формирует на поверхности детали тонкий слой нитридов, который обеспечивает повышенную износостойкость, высокую усталостную прочность и устойчивость к коррозии в определенных средах. Тем не менее, данные методы характеризуются низкой производительностью, высокой энергозатратностью и малой глубиной упрочненного слоя. Кроме того, высокие температуры обработки провоцируют рост зерна в структуре изделия, диффузию водорода и снижение показателей пластичности и вязкости.

В этой связи актуальным становится создание инновационных методов, обеспечивающих формирование на титановых сплавах покрытий с улучшенными триботехническими характеристиками при минимальных энергозатратах и временных расходах.

Обзор актуальных технологий поверхностного упрочнения деталей машин свидетельствует, что наибольший потенциал демонстрируют методы, основанные на применении концентрированных источников энергии (КИЭ). Данный подход обусловлен главной тенденцией развития современных способов обработки – необходимостью достижения высоких скоростей процессов нагрева, охлаждения и деформации. Подобное воздействие способствует увеличению плотности дефектов кристаллической решетки обрабатываемых материалов, изменению их пространственного распределения, что в конечном итоге приводит к существенному улучшению механических характеристик и других эксплуатационных свойств материалов, имеющих критическое значение для технической сферы.

Под термином «концентрированный поток энергии» понимается такой поток, который оказывает воздействие на ограниченный участок поверхности, характеризующийся плотностью тепловой мощности свыше 10^3 Вт/см^2.

В производственных условиях для поверхностного упрочнения преимущественно применяются лазерное воздействие, пучки электронов и плазменные потоки [3–5]. Несмотря на свои плюсы, данные технологии обладают и существенными минусами, среди которых выделяются высокая стоимость оборудования и, как следствие, рост затрат на обработку. Для уменьшения себестоимости обработки металлических изделий целесообразно применять сжатую электрическую дугу, обладающую плотностью мощности, сопоставимой с плазменной струей [6].

Ключевая специфика упрочнения титановых сплавов, отличающая их от железоуглеродистых систем, заключается в умеренном росте твердости поверхностных зон. Этот эффект обусловлен структурным укреплением, достигаемым благодаря быстрому нагреву тонкого слоя до температур, не превышающих порог фазовых превращений, а также поверхностной закалкой,

формирующей метастабильную фазовую структуру. Следовательно, главными механизмами повышения твердости поверхности при воздействии концентрированных источников энергии выступают:

1. Упрочнение посредством нагрева поверхностного слоя до температур, превышающих температуру плавления, с последующей ускоренной кристаллизацией, при которой достигается образование ультрамелкодисперсной кристаллической структуры, аморфного состояния вещества либо иных метастабильных состояний закристаллизованной поверхности;

2) Упрочнение за счет поверхностного легирования, достигаемое благодаря протеканию микрометаллургических процессов в расплавленном поверхностном слое и диффузионному взаимодействию легирующего элемента с основой сплава при оплавлении поверхности изделия.

Кроме того, при работе с титановыми сплавами следует принимать во внимание их высокую склонность к активному взаимодействию с атмосферным воздухом.

Задача настоящего исследования заключается в увеличении износостойкости и устойчивости к коррозии титановых сплавов с применением метода обработки поверхности плазменной струей.

Предложен метод поверхностного упрочнения титановых сплавов посредством воздействия сжатой электрической дугой (плазменная обработка.

Конструкция установки для поверхностного упрочнения (рис. 1) включает сварочную головку 1, в которой закреплен неплавящийся электрод 2. В зазоре между данным электродом и деталью 3 формируется сжатая электрическая дуга 4.

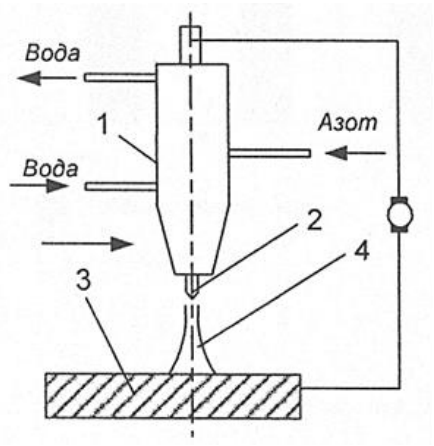


Рис. 1. Схема установки для поверхностного упрочнения титановых сплавов плазменной дугой

Дуга, сжатая электрическим током и горящая в азотной среде, перемещается над поверхностью детали со скоростью *V*, обеспечивая практически мгновенный локальный нагрев ее поверхностного слоя. Параллельно с этим за счет высокой скорости диффузии происходит насыщение этого слоя азотом, что особенно характерно для титана. Вследствие сверхбыстрого

нагрева и последующего охлаждения, обусловленного кондуктивным теплообменом, а также процесса поверхностного азотирования, на изделии формируется дорожка, отличающаяся высокой микротвердостью и устойчивостью к коррозии.

Параметры процесса характеризуются плотностью мощности электрической дуги свыше 10^3 Вт/см³, силой тока в диапазоне 60–200 А и напряжением 35–45 В. Скорость обработки варьируется от 0,005 до 0,03 м/с, а расход азота составляет 50–100 л/мин. При таких условиях диаметр зоны нагрева достигает 3–8 мм.

Метод обеспечивает обработку деталей плоской и цилиндрической конфигурации. При этом возможно выполнение работ как с перекрытием обрабатываемых полос, так и с заданным интервалом между ними.

Исследование было проведено на титановом сплаве марки ВТ6. Тестовые образцы выполнены в виде пластин размером 50×40×7 мм и подвергались обработке как с предварительным оплавлением поверхности, так и без него.

Исследование микроструктуры и размера зерен проводилось с использованием оптического микроскопа ЛабоМЕТ. Для выявления границ зерен применялось электролитическое травление шлифов в растворе, содержащем: 150 мл HCl, 50 мл HNO_3, 150 мл HF и 450 мл H_2O.

Значения микротвердости измеряли с использованием прибора ПМТ-3 при приложении нагрузки в 1 МПа. Показатели износостойкости определяли на трибологической установке, оценивая степень абразивного износа согласно общепринятой методике.

Коррозионные испытания упрочненных и неупрочненных образцов титановых сплавов проводили в 5%-м растворе HC1 в течение шести суток при комнатной температуре.

Исследования структуры упрочненных образцов титана показали, что зона нагрева имеет достаточно четкую границу раздела основного металла и упрочненного слоя (рис. 2).

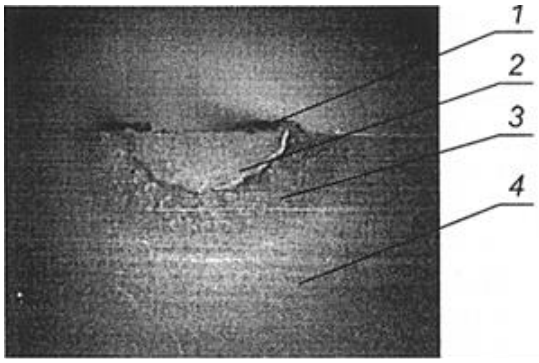


Рис. 2. Поперечный макрошлиф зоны обработки титанового сплава ВТ6

Поверхностный слой титана после обработки приобретает золотистый оттенок и включает в себя нитрид титана, а также оксидные и гидридные

включения. Он образует многослойную структуру, где слой нитрида титана (1) переходит в зону диффузионного насыщения (2), которая, в свою очередь, плавно переходит в зону термического влияния (3), соединяющуюся с основным материалом (4). Микротвердость упрочненного слоя достигает 9–12 ГПа по сравнению с исходными 4 ГПа, а его глубина может составлять до 1,5 мм (рис. 3). Ширина обработанной дорожки за один проход варьируется в пределах 2–6 мм.

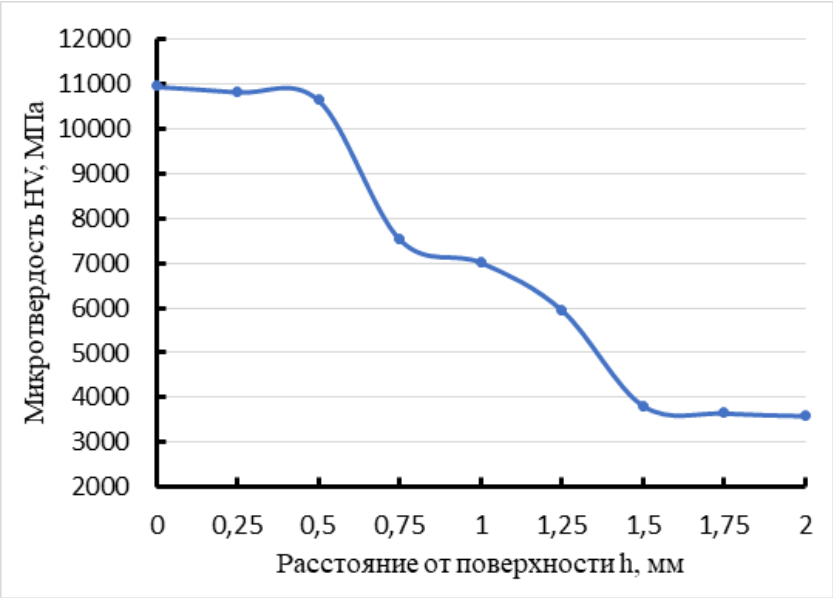


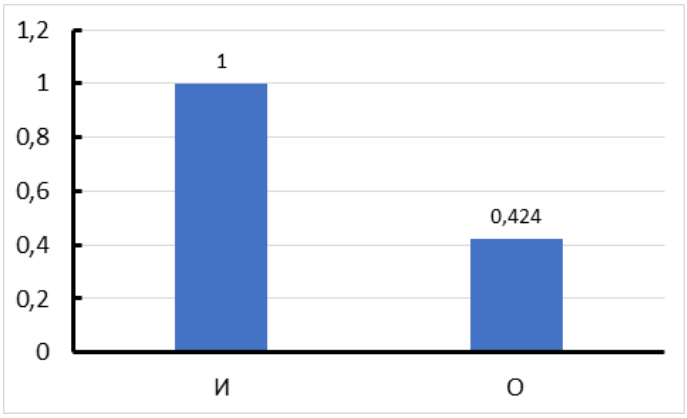
Рис. 3. Распределение микротвердости в упрочненном поверхностном слое титанового сплава ВТ6

На основе экспериментальных данных было выявлено, что использование скоростей обработки в диапазоне от 0,005 до 0,01 м/с и силы тока от 100 до 200 А обеспечивает формирование качественного упрочненного слоя с наибольшей глубиной.

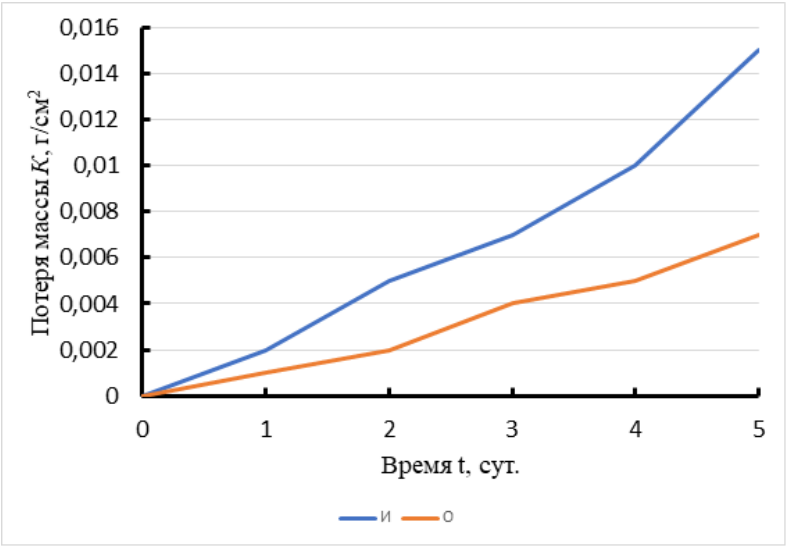
Пик микротвердости поверхностного слоя фиксируется при скоростях не выше 0,01 м/с и токе до 120 А. Если скорость превышает 0,03 м/с, а сила тока падает ниже 80 А, толщина и твердость упрочненного слоя уменьшаются из-за дефицита времени для термодиффузии и слабого нагрева. В случае же снижения скорости до значений менее 0,005 м/с и повышения тока свыше 150 А качество поверхности ухудшается, что сопровождается появлением дефектов в виде пор и трещин.

Рекомендуемая интенсивность подачи газа составляет 90 л/мин. Снижение этого показателя приводит к уменьшению объема образующегося нитрида титана, тогда как чрезмерно высокая скорость потока дестабилизирует горение плазменной дуги и вызывает разбрызгивание расплавленного металла.

Проведен анализ характеристик образцов, поверхность которых подверглась обработке плазменной дугой (см. рис. 4). Установлено значительное улучшение их износостойкости (рис. 4, *а*) и устойчивости к коррозии (рис. 4, *б*).



а



б

Рис. 4. Данные об износостойкости (а) и устойчивости к коррозии (б)

Независимо от выбранных параметров термического воздействия, механизм структурных трансформаций в титане и ряде его сплавов под действием плазмы остается практически неизменным. Процесс повышения прочности неизбежно сопровождается активным ростом зерен, если температура превышает точку α-β-превращения. Исследования показали, что в данном случае происходит измельчение зерен в поверхностном слое, подвергнутом модификации, что приводит к образованию мелкозернистой структуры (рис. 5).

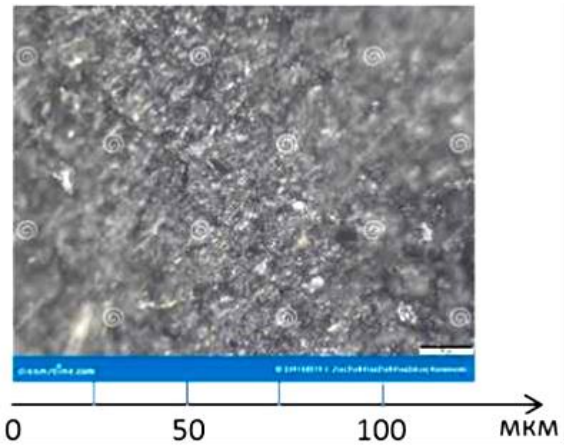


Рис. 5. Образование микрозернистой структуры на поверхности титана марки ВТ6

Применение концентрированных источников энергии при химико-термическом воздействии представляет собой перспективное направление для улучшения износостойкости титановых сплавов. В результате исследований удалось достичь роста микротвердости в 2,3 раза относительно исходного состояния. Показатели износостойкости возросли в среднем на 50%, а также было зафиксировано снижение коррозионных потерь.

Список литературы

1. Ляхович Л. С. Перспективы химико-термической обработки титана и его сплавов // Защитные покрытия на металлах. 1976. Вып. 10, С. 20–23.

2. Середа Б. П., Палехова И. В. Получение двухкомпонентных покрытий на основе титана методом СВС // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 11. С. 30–32.

3. Коваленко В. С, Головко Л. Ф., Черненко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. Киев : Тэхника, 1990,

4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1985.

5. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский, С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. И. Комар. Киев : Наука, 1990,

6. Поверхностное упрочнение стальных деталей сжатой электрической дугой / А. Е. Михеев, С. С. Ивасев, А. В. Гирн и др. // Сварочное производство. 2003. № 2. С. 24–27.

Клочков Я.М.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
gluhihyak@gmail.com
Овчинников В.В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедения»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru

СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СПЛАВА СИСТЕМЫ AL–ZN–MG–CA, ВЫПОЛНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аннотация. Исследованы закономерности формирования структуры и механических свойств стыковых соединений горячекатаных листов и литых заготовок из экспериментального сплава Al–5,5Zn–1,5Mg–1Ca–0,3Mn–0,2Zr–0,1Sc, выполненных односторонней сваркой трением с перемешиванием. Определены рациональные параметры режима, обеспечивающие бездефектное формирование шва. Установлено, что прочность соединения лимитируется прочностью литого полуфабриката, а коэффициент прочности относительно литой заготовки достигает 0,98–1,00, Показано, что металл ядра шва обладает повышенной прочностью (до 345–360 МПа) вследствие интенсивного диспергирования эвтектической фазы $(Al,Zn)_4Ca$. Принципиальным отличием от термоупрочняемых алюминиевых сплавов является отсутствие зоны разупрочнения в ЗТВ, что обусловлено высокой термической стабильностью кальцийсодержащей эвтектики. Дополнительно изучено влияние послесварочной термической обработки (закалка + искусственное старение) и холодной прокатки на комплекс свойств. Показано, что закалка со старением приводит к резкому снижению пластичности, тогда как холодная прокатка с последующим естественным старением обеспечивает равномерное упрочнение соединения.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием; алюминиево-кальциевые сплавы; микроструктура; механические свойства; термическая обработка; холодная прокатка; эвтектическая фаза.

Klochkov Ya.M.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
gluhihyak@gmail.com
Ovchinnikov V.V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru

STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL STABILITY OF FRICTION STIR WELDED JOINTS OF Al–Zn–Mg–Ca SYSTEM ALLOY

Abstract. The regularities of formation of structure and mechanical properties of butt joints of hot-rolled sheets and cast billets of experimental alloy Al–5.5Zn–1.5Mg–1Ca–0, 3Mn–0, 2Zr–0, 1Sc produced by single-sided friction stir welding are investigated. Rational parameters of welding mode providing defect-free weld formation are determined. It is established that joint strength is limited by strength of cast semi-finished product, and strength coefficient relative to cast billet reaches 0, 98–1.00. It is shown that weld nugget metal possesses increased strength (up to 345–360 MPa) due to intensive dispersion of eutectic phase $(Al,Zn)_4Ca$. Principal difference from heat-treatable aluminium alloys is absence of softening zone in HAZ, which is caused by high thermal stability of calcium-containing eutectic. Influence of post-weld heat treatment (quenching + artificial aging) and cold rolling on complex of properties is additionally studied. It is shown that quenching with aging leads to sharp decrease of plasticity, while cold rolling followed by natural aging ensures uniform hardening of joint.

Keywords: friction stir welding; aluminium-calcium alloys; microstructure; mechanical properties; heat treatment; cold rolling; eutectic phase.

Создание интегрированных облегчённых конструкций, сочетающих литые элементы сложной геометрии и деформированные полуфабрикаты с высокими механическими характеристиками, является актуальной задачей современного авиастроения и транспортного машиностроения. Традиционные методы сварки плавлением таких комбинаций сталкиваются с рядом проблем, среди которых образование горячих трещин, пористость и разупрочнение в околошовной зоне [1, 2]. Перспективной альтернативой выступает сварка трением с перемешиванием (СТП) – твердофазный процесс, в котором соединение формируется при температурах ниже солидуса, что принципиально исключает дефекты литейного происхождения [3].

Особый интерес в последние годы вызывают эвтектические сплавы системы Al–Ca–Zn–Mg. Благодаря присутствию добавок кальция и цинка в структуре формируется термически стабильная эвтектика (Al) + Al_4Ca, способная растворять значительное количество цинка и сохранять морфологию при нагревах, типичных для технологических операций изготовления и упрочнения полуфабрикатов [4–6]. В отличие от широко распространённых термически упрочняемых сплавов серий 6xxx и 7xxx, упрочнение которых достигается за счёт метастабильных выделений, склонных к коагуляции и растворению при сварочном нагреве, в рассматриваемом классе материалов основным носителем прочности является стабильная эвтектическая составляющая. Это предопределяет принципиально иную реакцию структуры на термический цикл СТП и позволяет ожидать отсутствия характерного «провала» твёрдости в зоне термического влияния (ЗТВ) [7].

Целью настоящей работы явилось комплексное исследование закономерностей формирования структуры и механических свойств стыковых соединений сплава системы Al–Zn–Mg–Ca в литом и горячекатаном состояниях, выполненных методом СТП, а также оценка влияния послесварочной

термической обработки и холодной пластической деформации на комплекс свойств.

Исследовался экспериментальный сплав номинального состава Al–5,5Zn–1,5Mg–1Ca–0,3Mn–0,2Zr–0,1Sc (мас.%). Слитки получали плавкой в печи сопротивления при 850 °C с разливкой в графитовые изложницы. Часть слитков подвергали горячей прокатке при температуре 450 °C на стане ДУО 260 с суммарной степенью деформации 75% до толщины 5 мм. Исходные механические свойства полуфабрикатов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Механические свойства исходных заготовок сплава Al–Zn–Mg–Ca

Состояние сплава	Временное сопротивление при растяжении σB, МПа	Условный предел текучести σ0,2, МПа	Относительное удлинение δ,%
Литое	219–240	176–182	1,71–3,22
Горячекатанное	330–335	275–285	4,3–4,85

Сварку трением с перемешиванием выполняли на экспериментальной установке, созданной на базе вертикально-фрезерного станка с ЧПУ. Применяли инструмент из стали Р6М5 с диаметром заплечика 22 мм и коническим стержнем Ø4,2 мм, оснащённым винтовой канавкой. Параметры режима СТП: частота вращения 800–900 об/мин, скорость сварки 85–150 мм/мин, угол наклона оси инструмента 2,5°, осевое усилие 8,4–9,2 кН. Выбор оптимальных значений осуществляли по критерию отсутствия внутренних и поверхностных дефектов в макроструктуре шва.

Механические испытания сварных соединений проводили по ГОСТ 6996–66 на универсальной электромеханической машине Instron 5980, микротвёрдость по Виккерсу измеряли на приборе Duramin 5 с шагом 0,5 мм при нагрузке 490,6 мН. Микроструктурные исследования выполняли с помощью оптического микроскопа Olympus GX41 и сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3, оснащённого системой микроанализа Oxford Instruments. Для выявления структуры использовали реактив Келлера. Тонкую структуру изучали методом просвечивающей электронной микроскопии на JEOL JEM 1400,

После сварки часть образцов подвергали термической обработке по режиму: закалка 500 °C, 1 ч, охлаждение в воде + искусственное старение 160 °C, 16 ч. Отдельную серию образцов подвергали холодной прокатке при комнатной температуре со степенью обжатия 30% (от 5 до 3,5 мм) без предварительного отжига.

Параметры режима и качество формирования шва. В интервале скоростей сварки 95–125 мм/мин (частота вращения 800 об/мин) получены бездефектные соединения с гладкой поверхностью и отсутствием внутренних несплошностей. Тепловые измерения показали, что при оптимальном режиме пиковая температура в ядре шва составляет 370–385 °C. При скорости ниже 85 мм/мин наблюдается перегрев и образование избыточного грата;

увеличение скорости свыше 150 мм/мин приводит к несплавлениям в корне шва и возрастанию усилий на инструменте. Положение литой заготовки относительно направления вращения инструмента (набегающая или отступающая сторона) не оказывало существенного влияния на макроструктуру соединения и основные параметры режима. Макроструктура полученного сварного соединения приведена на рисунке 1. Видно, что шов имеет плотное строение без внутренних несплошностей и трещин, характерных для сварки плавлением.

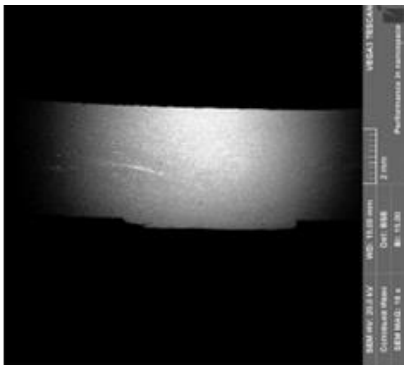


Рис. 1. Макроструктура стыкового СТП-соединения сплава Al–Ca–Zn–Mg в сочетании «литая заготовка + горячекатаный лист

Механические свойства соединений. Усреднённые результаты статических испытаний на растяжение для сочетания «литая заготовка + горячекатаный лист» представлены в таблице 2.

Таблица 2

Механические свойства сварных соединений сплава Al–Zn–Mg–Ca (СТП, n=800 об/мин, v=115 мм/мин)

Положение литой заготовки относительно направления вращения инструмента	Предел прочности сварного соединения σВ, МПа	Коэффициент прочности К1 относительно литой заготовки	Коэффициент прочности К2 относительно горячекатанной заготовки	Зона разрушения сварного соединения	Предел прочности металла шва $\sigma_{шВ}$ $\sigma_{Вш}$, МПа	Угол изгиба α, град.
Со стороны набегания	232–247 240	1	0,72	По зоне ЗТМВ со стороны литой заготовки	340–352 345	48–52 50
Со стороны отхода	228–245 235	0,98	0,71		340–352 345	42–48 46

Прочность соединения полностью определяется прочностью менее прочного звена – литой заготовки, при этом коэффициент прочности относительно неё приближается к 1,0, Разрушение во всех случаях происходило по зоне термомеханического воздействия со стороны литого полуфабриката. Прочность металла непосредственно в зоне перемешивания достигает

345 МПа, что превышает прочность горячекатаного листа. Это свидетельствует о значительном структурном упрочнении в ядре шва.

Микроструктура и микротвёрдость. Металлографический анализ выявил глубокую фрагментацию и равномерное распределение частиц эвтектической фазы $(Al,Zn)_4Ca$ в зоне перемешивания (рис. 2). Средний размер частиц в исходном литом металле составлял 7–8 мкм, в катаном – около 7,2 мкм, а в ядре шва снижался до 4,5–6,5 мкм. Строчечная направленность структуры, характерная для горячекатаного состояния, полностью исчезала, сменяясь однородной дисперсной морфологией.

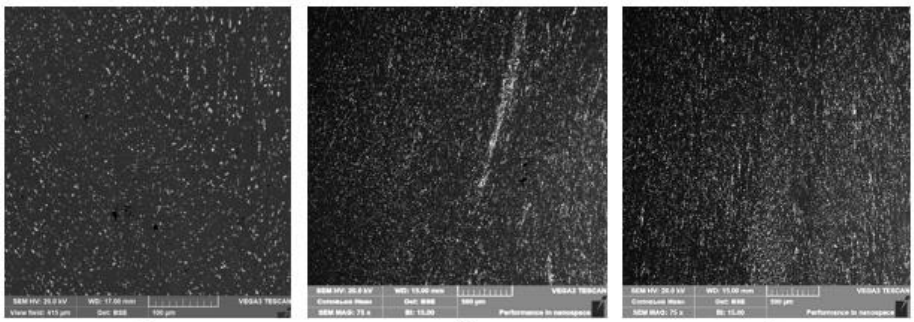


Рис. 2 Микроструктура сварного соединения сплава Al–Ca–Zn–Mg:
а – литая заготовка; б – зона перемешивания (сварной шов); в – горячекатаный лист

Микротвёрдость поперечного сечения соединения, измеренная для двух исследованных режимов (с различным тепловложением), не обнаруживает характерного для термоупрочняемых сплавов «провала» в ЗТВ (рис. 3). Твёрдость в центре шва и в прилегающих зонах остаётся на уровне исходного литого металла или несколько превышает его, что объясняется эффектами динамической рекристаллизации и диспергирования упрочняющих частиц. Термическая стабильность эвтектики Al_4Ca препятствует растворению или коагуляции упрочняющей фазы при температурах сварочного цикла, что и обеспечивает отсутствие локального разупрочнения.

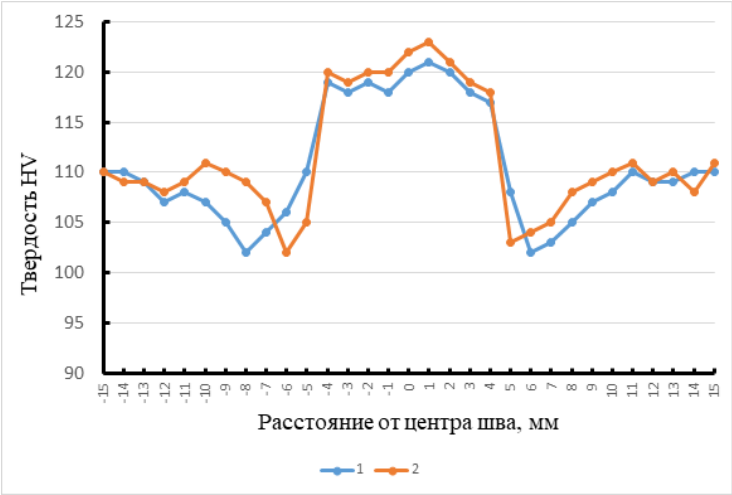


Рис. 3 Распределение микротвёрдости в сварном соединении сплава Al–Ca–Zn–Mg, выполненном СТП на режимах с высоким (K=9,41) и низким (K=6,95) тепловложением

Влияние термической обработки. После проведения закалки и искусственного старения прочность сварного соединения снижалась незначительно (с 322 до 311 МПа), однако пластичность резко падала: относительное удлинение уменьшалось с 3,2% до 0,4%, т.е. примерно в 8 раз (табл. 3). Замеры микротвёрдости показали, что закалка выравнивает значения по сечению, а последующее старение приводит к общему росту твёрдости, однако зона термомеханического воздействия становится наименее прочной областью, в которой и происходит разрушение при растяжении.

Таблица 3

Влияние термической обработки после СТП на свойства соединений горячекатаных листов сплава Al–Zn–Mg–Ca

Состояние до сварки	Термическая обработка после сварки	Условный предел текучести σ0,2, МПа	Временное сопротивление σВ, МПа	Относительное удлинение δ,%
Горячекатаное	Нет	240,7–242,2 241,5	296,2–348,5 322,3	2,05–4,35 3,20
Горячекатаное	Закалка и искусственное старение	–	291,1–330,7 310,9	0,27–0,54 0,40

Аномальный рост зерна в зоне перемешивания после высокотемпературной выдержки под закалку не зафиксирован, что объясняется стабилизирующим действием большого числа дисперсных частиц нерастворимой фазы. Тем не менее, резкое снижение пластичности делает применение упрочняющей термообработки для данного сплава нецелесообразным.

Холодная прокатка сварного соединения. Холодная прокатка с обжатием 30% не привела к образованию трещин или расслоений ни в шве, ни в основном металле. Непосредственно после деформации распределение микротвёрдости по длине образца было равномерным (~80 HV). Через семь суток естественного старения зафиксирован прирост твёрдости: в горячекатаном листе до 110 HV, в металле шва до 100 HV, в литой заготовке до 90 HV. Такой эффект указывает на протекание процессов, аналогичных естественному старению, что открывает возможность финишного деформационного упрочнения сварных узлов.

Полученные результаты демонстрируют, что сплавы системы Al–Zn–Mg–Ca с добавками марганца, циркония и скандия обладают уникальным сочетанием свариваемости методом СТП и стойкости к термическому разупрочнению. Прочность сварного соединения определяется прочностью литого элемента, при этом в зоне перемешивания формируется дисперсная структура с повышенными механическими характеристиками. Традиционная для алюминиевых сплавов проблема разупрочнения в ЗТВ отсутствует. Попытки применения упрочняющей термообработки приводят к охрупчи-

ванию, что ограничивает её использование. В то же время холодная пластическая деформация сварных конструкций является перспективным направлением повышения комплекса свойств.

1. Определены рациональные режимы односторонней СТП стыковых соединений литых и горячекатаных заготовок сплава Al–5,5Zn–1,5Mg–1Ca–0,3Mn–0,2Zr–0,1Sc: частота вращения инструмента 800–900 об/мин, скорость сварки 95–125 мм/мин, наклон 2,5°, усилие прижима 8,4–9,2 кН.

2. Коэффициент прочности соединений относительно литой заготовки составляет 0,98–1,00, разрушение локализуется в ЗТМВ литого полуфабриката. Металл ядра шва упрочняется до 345–360 МПа за счёт диспергирования эвтектической фазы $(Al,Zn)_4Ca$.

3. В зоне термического влияния не наблюдается снижения твёрдости, что связано с термической стабильностью кальцийсодержащей эвтектики.

4. Послесварочная закалка и искусственное старение вызывают резкое падение пластичности (δ снижается с 3,2% до 0,4%) и не рекомендуются для данного сплава.

5. Сварное соединение выдерживает холодную прокатку с обжатием 30% без нарушения сплошности. Последующее естественное старение обеспечивает повышение микротвёрдости во всех зонах соединения, что открывает возможность создания упрочнённых литоштампосварных конструкций.

Список литературы

1. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов: монография / А.М. Дриц, В.В. Овчинников. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Руда и Металлы, 2020, – 468 с.

2. Овчинников В.В. Показатели свариваемости при сварке плавлением перспективных алюминиевых сплавов на основе системы Al–Ca–Zn–Mg / В.В. Овчинников, Т.К. Акопян, Е.О. Проценко, Д.А. Поляков // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2023. – № 4. – С. 11–23.

3. Ищенко А.Я. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) / А.Я. Ищенко, С.В. Подъельников, А.Г. Покляцкий // Автоматическая сварка. – 2007. – № 11. – С. 32–38.

4. Белов Н.А. Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования : монография / Н.А. Белов, Е.А. Наумова, Т.К. Акопян. – Москва : Руда и металлы, 2016. – 288 с.

5. Дорошенко В.В. Фазовый состав и особенности микроструктуры сплавов системы Al–Ca–Zn–Mg / В.В. Дорошенко, Е.А. Наумова, Т.А. Базлова, М.Е. Самошина // Цветные металлы. – 2017. – № 9. – С. 69–75. – DOI: 10, 17580/tsm.2017.09.11.

6. Shurkin P.K. Effect of calcium and silicon on the character of solidification and strengthening of the Al–8% Zn–3% Mg alloy / P.K. Shurkin, N.A. Belov, A.F. Musin, M.E. Samoshina // Physics of Metals and Metallography. – 2020, – Vol. 121, No. 2. – P. 135–142.

7. Akopyan T.K. Analysis of the effect of friction stir welding on the structure and properties of a new Al–Ca–Zn–Mg-based eutectic alloy / T.K. Akopyan, V.V. Ovchinnikov, M.A. Barykin, N.V. Letyagin, I.S. Soloviev // Metallurgist. – 2025. – Vol. 69. – P. 687–695. – DOI: 10, 1007/s11015-025-01988-3.

Доан Суан Куанг
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
doanquang1809@gmail.com
Филиппов Ю.К.
д.т.н., профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
yulianf@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСА ГОРНОГО РЕЗЦА МЕТОДОМ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Аннотация. Исследованию подвергается процесс изготовления корпуса горного резца методом холодной объемной штамповкой. При формообразовании детали проводится моделирование процессов изготовления методом пластической деформации. Для моделирования исползуется конечно-элементная система Q-Form 3D. Приводятся исходные данные и результаты моделирования. При производстве различных по форме деталей важнейшую роль играет исследование формообразования при холодной объемной штамповке моделирование методом конечно-элементного анализа. Теоретическое исследование методом конечно-элементного анализа показывает все интересующие инженера характеристики при разработке новых технологических процессов. Практика показывает, при производстве изделий холодной объемной штамповкой, процесс, которых был рассчитан на ЭВМ конечно-элементной системой, не отличается от действительного.

Ключевые слова: холодная объемная штамповка, корпус горного резца, моделирование, метод конечных элементов.

Doan Xuan Quang
Postgraduate Student,
Moscow Polytechnic University,
Russia, Moscow
doanquang1809@gmail.com
Filippov Yu.K.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Deptartment of Materials Forming and Additive Technologies
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
yulianf@mail.ru

INVESTIGATION INTO THE MANUFACTURING PROCESS OF A MINING CHISEL BODY USING COLD BULK FORGING

Abstract. This study investigates the manufacturing process of a mining chisel body using the cold bulk forging method. During the component forming stage, simulation of the manufacturing processes is carried out using plastic deformation methods. The QForm 3D finite element system is utilized for the simulation. The initial data and simulation results are presented. In the production of components with various geometries, investigating the material

flow during cold bulk forging and simulation via finite element analysis play a crucial role. Theoretical research using the finite element method provides engineers with all the necessary characteristics required when developing new technological processes. Practice shows that in the production of parts by cold bulk forging, computer-aided processes calculated using finite element systems do not deviate from actual operations.

Keywords: cold bulk forging, mining chisel body, simulation, finite element method.

Корпус горного резца традиционно изготавливаются путем механической обработки (резания) или комбинации горячей объемной штамповки с последующей механообработкой, что является дорогостоящим и требует значительных временных затрат. Современные разработки в области штамповки позволяют производить корпус горного резца с использованием технологии холодной штамповкой. Холодная объемная штамповка деталей, позволяющий получать изделия с высокой точностью и улучшенными механическими характеристиками. В отличие от традиционных методов механической обработки, этот способ обеспечивает значительную экономию материала и повышение производительности.

Современное развитие материального производства основано на повышении эффективности и качества. Одним из основных направлений развития научно-технического прогресса в машиностроении и металлообработке является комплексная разработка, совершенствование и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов и оборудования. Прецизионная штамповка корпус горного резца обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами, поскольку позволяет получать детали без облоя и, как следствие, без необходимости последующей механической обработки. Внедрение такой технологии обеспечивает значительные экономические и экологические выгоды за счет экономии материала и энергии, а также снижает себестоимость благодаря высокой производительности. Кроме того, корпус горного резца, изготовленные методом холодной штамповкой, обладают улучшенными механическими свойствами по сравнению с традиционными технологиями, поскольку их микроструктура остается неизменной из-за отсутствия интенсивной механообработки.

В течение последних лет процессы холодной штамповки корпуса горного резца исследовались с помощью различных аналитических и численных методов, включая метод слябов, метод верхней оценки и метод конечных элементов (МКЭ). Большинство этих подходов применялось для прогнозирования усилия холодной штампоки и распределения ключевых параметров на финальной стадии процесса. Однако, за исключением МКЭ, остальные методы имеют ограничения при моделировании постепенного течения материала из-за необходимости упрощения математического аппарата.

В данной работе исследованию подвергается технологический процесс изготовления корпуса горного резца в результате пластической деформации деталей конечно-элементной системой Q-Form 3D.

Целью работы является разработка и исследование технологического процесса создания корпуса горного резца в результате пластической деформации детали с заданной конфигурацией и геометрическими размерами.

На рисунке 1 показана исследуемая деталь «корпус горного резца». Корпус горного резца представляет собой осесимметричную деталь типа «валы со ступенчатым и коническим профилем», имеющую глухое внутреннее отверстие с углом при вершине 120° для установки твердосплавной пластины. Конструкция включает несколько технологических переходов: конические поверхности с углами 28° и 5°, и цилиндрические участки с жесткими допусками. Изделие изготавливается из высокопрочной конструкционной стали для того, чтобы обеспечивает высокую износостойкость и ударную вязкость в условиях тяжелых динамических нагрузок при разрушении горных пород. Ввиду того, что корпус горного резца является быстроизнашивающимся расходным инструментом для проходческих и очистных комбайнов, объем их ежегодного производства в России носит массовый характер и исчисляется миллионами штук в год. Для детали корпуса горного резца с целью обеспечения конкурентоспособности изготовления изделий необходимо снижать себестоимость за счет внедрения новых технических решений.

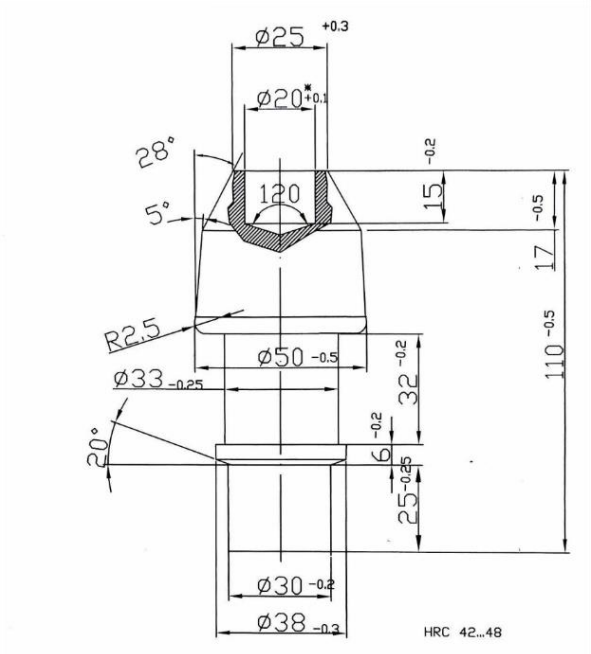


Рис. 1. Деталь «Корпус горного резца»

В ходе исследования был проведен комплексный анализ процесса штамповки корпуса горного резца из стали 30ХГСА. Особое внимание уделялось компьютерному моделированию в QForm 3D, которое позволило детально изучить особенности течения металла, распределение напряжений и деформаций в заготовке. Программный комплекс обеспечил возможность визуализации процесса заполнения корпуса горного резца и выявления потенциальных дефектов.

Материал заготовки сталь 10, коэффициент трения 0,1, температура окружающей среды и заготовки на каждом переходе 20ºС. Деформация производится в гидровлическом прессе усилием 63 МН.

Технологический процесс изготовления корпуса горного резца показан на рис. 2.

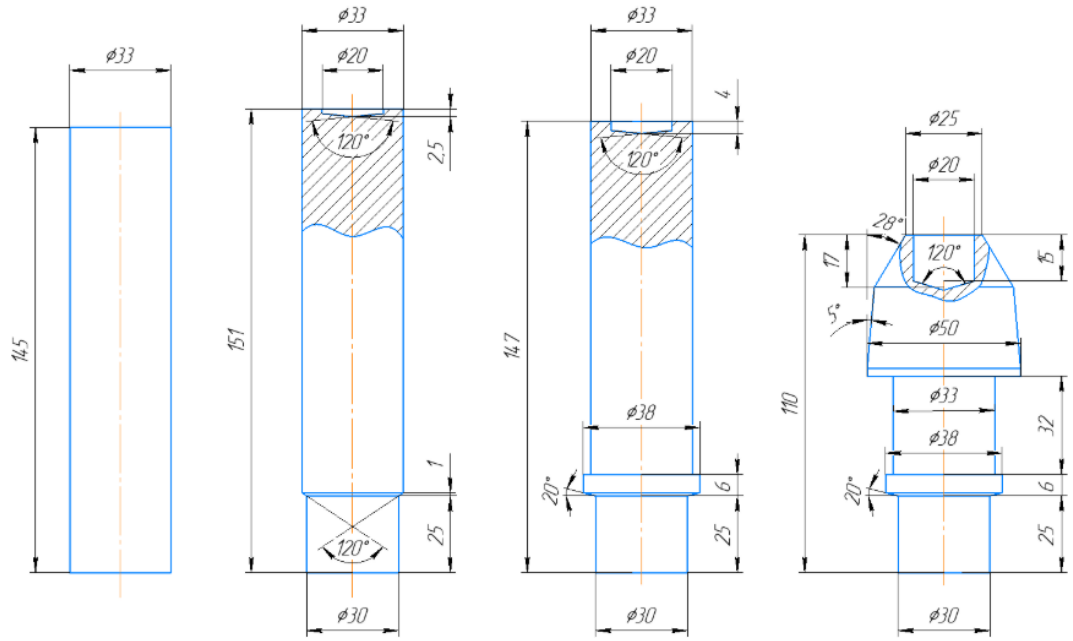


Рис. 2. Технологический процесс изготовления корпуса горного резца

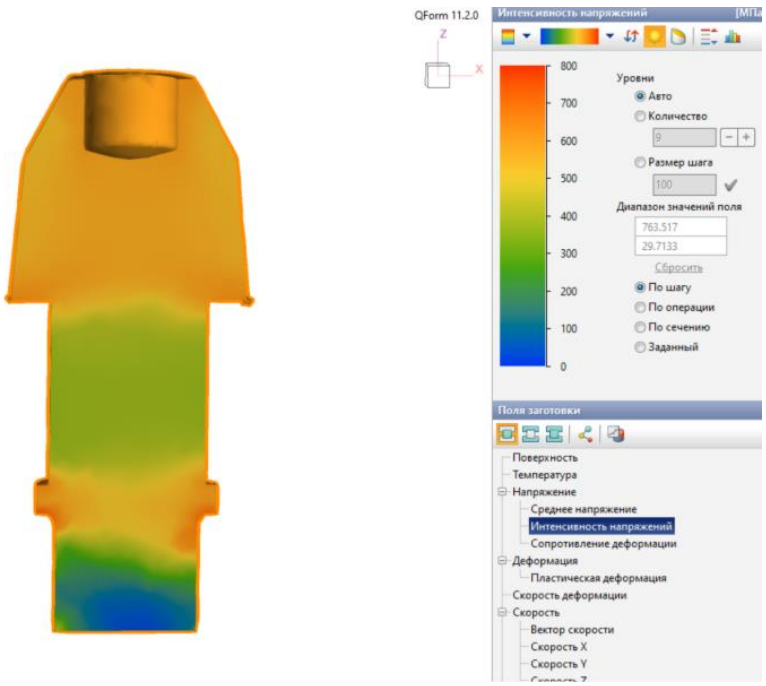


Рис. 3. Интенсивность напряжений корпуса горного резца после холодной объемной штамповки

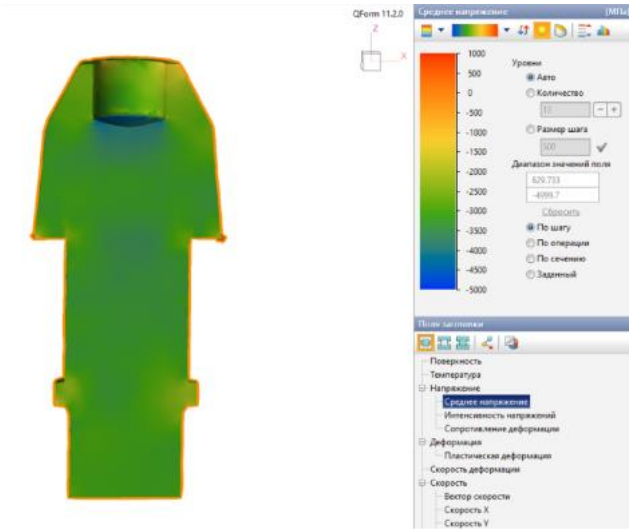


Рис. 4. Среднее напряжение корпуса горного резца после холодной объемной штамповки

Процесс заполнения полости штампа протекает стабильно: поток металла движется непрерывно, полностью оформляя сложные геометрические элементы детали без образования таких дефектов, как недопрессовка. Главным достоинством полученных результатов является исключительно благоприятное распределение накопленной пластической деформации с точки зрения реальных условий эксплуатации детали. Так, в зоне верхней глухой полости – участка, подвергающегося наиболее интенсивному ударно-абразивному износу при работе резца – уровень пластической деформации достигает оптимальных повышенных значений 2.5–3.5, с локальными пиками интенсивных сдвигов. Благодаря эффекту деформационного упрочнения микроструктура металла в головной части сильно уплотняется, волокна ориентируются строго вдоль контура детали, что обеспечивает максимальную поверхностную твердость и усталостную прочность без необходимости проведения сложной термической обработки. В то же время центральное ядро и средняя цилиндрическая часть стержня сохраняют минимальный уровень деформации (зона синего цвета), благодаря чему сберегается исходная вязкость сердцевины материала. Это позволяет сформировать идеальную структуру типа «твердая оболочка – вязкая сердцевина», гарантирующую высокую стойкость детали к динамическим и циклическим нагрузкам. Даже в местах концентрации напряжений, таких как средний буртик и переходные радиусы, течение металла остается достаточно плавным.

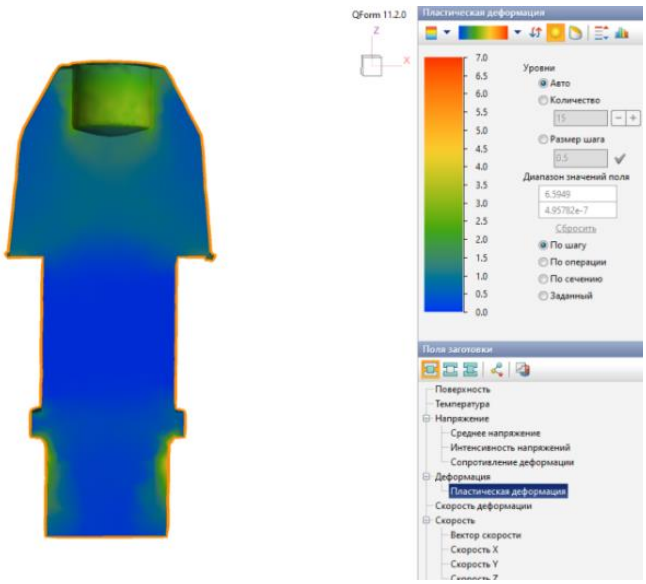


Рис. 5. Пластическая деформация зубчатой шестерни после холодной объемной штамповки

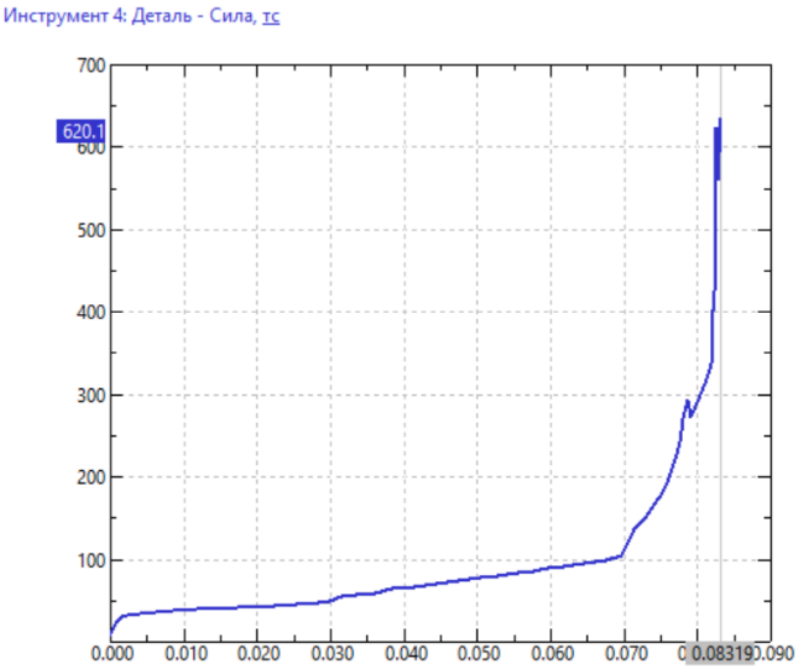


Рис. 6. Усилие инструмента в процессе холодной объемной штамповки

Отметим такие важные показатели, как: максимальное усилие, требующееся для данного технологического процесса, равное 620 тонн, а также максимальная степень деформации равная. Эти показатели потребуются в дальнейшем для выбора наиболее выгодного, с точки зрения серийного производства, технологического процесса.

Преимущества разработанной технологии включают высокую точность изготовления, значительную экономию материала за счет отсутствия облоя (до 20%), а также сокращение времени на разработку технологического процесса. Использование QForm 3D позволило сократить сроки проектирования с 2–3 недель до 4–6 часов компьютерного моделирования.

Проведенное исследование демонстрирует эффективность применения компьютерного моделирования при разработке технологических процессов холодной объемной штамповки. Полученные результаты имеют важное практическое значение для машиностроительных предприятий, позволяя оптимизировать производство корпуса горного резца и повысить их качественные характеристики.

Проведенное исследование убедительно доказало эффективность применения метода холодной объемной штамповки в сочетании с компьютерным моделированием в QForm 3D для производства горного резца. Полученные результаты демонстрируют значительные преимущества данного подхода, включая высокую точность изготовления, существенную экономию материала (до 20%) и сокращение сроков разработки технологического процесса. Моделирование позволило оптимизировать параметры штамповки, минимизировать возможные дефекты и обеспечить стабильное качество продукции. Особенно важно отметить хорошую корреляцию между результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными, что подтверждает надежность используемой методики.

Список литературы

1. Холодная объемная штамповка. справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого, В.А.Головина, А.Ф.Нистратова. М.: ВМашиностроение, 1973. 496 с.

2. Навроцкий Г. А., Головин В. А., Филиппов Ю. К. Исследование пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением методом муаровых полос. Учебное пособие. М.: МАМИ. 1985.65с.

3. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2010, № 1. С. 166–170, 0 4

4. Филиппов Ю. К., Гневашев Д. А., Ле Чунг Зунг, Доан Суан Куанг. Точность определения деформации при построении кривых упрочнения при испытании образцов на одноосное сжатие // Черные металлы. 2024. № 6. С. 76–81.

5. Талеров М. П. Зависимость износостойкости корпуса резцов горного инструмента от распределения твердости по длине резца // Записки Горного института. – 2010, – Т. 186. – С. 140–142

6. Хомич В. Г. Компьютерное моделирование процесса холодной объемной штамповки детали «дорожный резец» / В. Г. Хомич, Ю. К. Филиппов //Московский политехнический университет, 2020, – С. 170–174.

СЕКЦИЯ 3
ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА

Лихота Р.В.
студент
Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, Иркутск
Likhotar@mail.ru
Лонцих П.А.
д.т.н., профессор кафедры автоматизации и управления
Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, Иркутск
palon@list.ru
Лонцих Н.П.
к.п.н., доцент кафедры автоматизации и управления
Иркутский национальный исследовательский технический университет
Россия, Иркутск
natalysib@list.ru

DIGITAL 5S: AI-АССИСТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА В КОНЦЕПЦИИ LEAN 4.0

Аннотация. Статья посвящена цифровой трансформации системы 5S в концепции Lean 4.0, Актуальность исследования обусловлена активным развитием цифровых версий инструментов бережливого производства (VSM 4.0, Kanban 4.0, JIT 4.0, Kaizen 4.0 и др.) при явном дефиците научных и прикладных работ, направленных на автоматизацию и оптимизацию методологии 5S, являющейся фундаментом организации рабочего пространства. В статье рассмотрены два наиболее показательных промышленных кейса в области цифровизации 5S: IIoT-архитектура для поддержания этапов стандартизации и совершенствования (Peças et al., 2026) и система AI-аудита для автоматической оценки соблюдения принципов 5S (Maciel & Veraldo, 2025). Выявлено общее ограничение существующих подходов – они ориентированы на контроль и оценку, но не решают задачу оптимизации физической компоновки рабочего места на основе объективных данных о частоте использования предметов и эргономических критериях. Для восполнения данного пробела предложена авторская концепция Digital 5S – AI-ассистированной модели персонализации рабочего пространства. Модель обеспечивает полный цикл цифровой трансформации 5S: анализ содержимого рабочего пространства с помощью компьютерного зрения, оптимизацию компоновки на основе генеративного дизайна и материализацию стандарта посредством 3D-печати. Предложенная концепция создает основу для разработки программного продукта, позволяющего автоматизировать проектирование персонализированных органайзеров и повысить эффективность использования рабочего пространства.

Ключевые слова: Lean 4.0, система 5S, искусственный интеллект, компьютерное зрение, генеративный дизайн, 3D-печать.

Likhota R.V.
Student
Irkutsk National Research Technical University
Russia, Irkutsk

Likhotar@mail.ru
Lontsikh P.A.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Control
Irkutsk National Research Technical University
Russia, Irkutsk
palon@list.ru
Lontsikh N.P.
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
of the Department of Automation and Control
Irkutsk National Research Technical University
Russia, Irkutsk
natalysib@list.ru

DIGITAL 5S: AI-ASSISTED MODEL FOR WORKSPACE PERSONALIZATION IN THE LEAN 4.0 CONCEPT

Abstact. The article is devoted to the digital transformation of the 5S system within the Lean 4.0 concept. The relevance of the study is due to the active development of digital versions of lean manufacturing tools (VSM 4.0, Kanban 4.0, JIT 4.0, Kaizen 4.0, etc.) with a clear lack of scientific and applied research aimed at automating and optimizing the 5S methodology, which is the foundation of workspace organization. The article examines two of the most representative industrial cases in the field of 5S digitalization: an IIoT architecture for maintaining the standardization and sustainment stages (Peças et al., 2026) and an AI audit system for automatically assessing compliance with the 5S principles (Maciel & Veraldo, 2025). A common limitation of existing approaches is identified – they focus on control and assessment but do not solve the problem of optimizing the physical layout of the workplace based on objective data on the frequency of use of items and ergonomic criteria. To fill this gap, the author's concept of Digital 5S is proposed – an AI-assisted model for workspace personalization. The model provides a full cycle of digital transformation of 5S: analysis of workspace content using computer vision, layout optimization based on generative design, and materialization of the standard through 3D printing. The proposed concept creates a basis for the development of a software product that allows automating the design of personalized organizers and increasing the efficiency of workspace use.

Keywords: Lean 4.0, 5S methodology, artificial intelligence, computer vision, generative design, 3D printing.

Бережливое производство, широко признанное и принятое в промышленной среде, предполагает тесную интеграцию человека в производственный процесс, непрерывное совершенствование и фокус на деятельности, создающей ценность [9]. Зародившись в производственной системе Toyota, этот подход доказал свою эффективность в устранении потерь и повышении операционной эффективности на протяжении десятилетий.

Глобальные изменения производства последних лет способствовали возникновению новой парадигмы – Индустрия 4.0, или четвертая промышленная революция. Термин «Industrie 4.0» был впервые представлен широкой публике в 2011 году на Ганноверской ярмарке в рамках немецкой инициативы по повышению конкурентоспособности промышленности через цифровизацию, его основоположниками стали Хеннинг Кагерманн, Вольфганг Вальстер и другие представители немецкой академии наук [7].

Ключевыми технологиями Индустрии 4.0 выступают промышленный Интернет вещей (IIoT), киберфизические системы, облачные вычисления, анализ больших данных, искусственный интеллект и аддитивное производство (3D-печать) [1, 4]. Эти технологии в совокупности позволяют создавать «умные фабрики», где все элементы производственного процесса связаны в единую сеть и могут обмениваться информацией в режиме реального времени [1].

В этих условиях бережливое производство не только не утрачивает своей актуальности, но и получает новый импульс для развития. Исследователи говорят о синергии Lean и Индустрии 4.0, отмечая, что цифровые технологии могут усиливать принципы бережливого производства, а Lean-культура, в свою очередь, способствует более эффективному внедрению технологий [12, 14]. Так формирование концепции Lean 4.0 – закономерный этап эволюции бережливого производства в цифровую эпоху.

Lean 4.0 находит свое практическое воплощение в цифровой трансформации конкретных инструментов бережливого производства. В исследованиях наблюдается активное развитие целого ряда направлений, среди которых особое место занимает методология 5S. При этом именно 5S в контексте Lean 4.0 вызывает наибольший интерес для авторов настоящей статьи, поскольку, несмотря на свою фундаментальную роль в бережливом производстве, эта методология остается наименее исследованной с точки зрения цифровой трансформации. В связи с этим в данной работе будет проведен анализ существующих подходов к интеграции 5S с технологиями Индустрии 4.0, представленных в трудах зарубежных и российских авторов, а также предложена авторская концепция цифровой поддержки организации рабочего пространства.

Проведенный систематический анализ литературы в базах Scopus, Web of Science, IEEE Xplore и eLibrary по тематике Lean 4.0 показал, что цифровая трансформация в рамках данной концепции активно проявилась в развитии ряда инструментов бережливого производства:

VSM 4.0 (картирование потока создания ценности). Классическое VSM позволяло создавать статичные карты потока на основе ручного сбора данных, что давало лишь «моментальный снимок» процесса, быстро теряющий свою актуальность. Благодаря интеграции с технологиями интернета вещей и больших данных, VSM 4.0 обеспечивает мониторинг потоков в режиме реального времени. Датчики автоматически собирают информацию о состоянии материалов и оборудования, отображая узкие места и простои по мере их возникновения. Это позволяет не только фиксировать текущее состояние, но и прогнозировать проблемы на основе накопленных данных, делая картирование непрерывным процессом [6, 15].

Kanban 4.0 (система вытягивания). Традиционный канбан использовал физические карточки и доски для управления запасами и производственными заказами, что создавало риски потери карточек, ошибок при ручном вводе и задержек в передаче информации. Цифровизация канбан-системы

заменяет физические носители электронными уведомлениями, синхронизированными с ERP-системой предприятия. Интеграция с RFID-метками позволяет автоматически отслеживать движение материалов и мгновенно обновлять статус заказов, а связь с 3D-принтерами дает возможность запускать производство деталей точно в срок на основе цифровых заказов [11, 15].

Andon 4.0 (система оповещения). Андон, представлявший собой световые табло, которые оператор вручную активировал при возникновении проблемы, сегодня трансформируется в цифровую сеть с удаленным доступом. Датчики оборудования и системы компьютерного зрения фиксируют отклонения автоматически и мгновенно оповещают ответственных сотрудников через мобильные устройства. Это сокращает время реакции на сбои и позволяет накапливать статистику для предиктивной аналитики [12, 14].

Jidoka 4.0 (автономизация). Классический принцип дзидока предполагал, что оборудование останавливается при возникновении проблемы, а оператор выявляет и устраняет причину. Сегодня киберфизические системы и машинное обучение наделяют оборудование способностью не только останавливаться, но и анализировать причины сбоев. Используя архивные данные, система может предсказывать вероятные отказы и предлагать варианты их предотвращения еще до того, как проблема возникнет [12, 13].

TPM 4.0 (цифровое предиктивное обслуживание). Всеобщее производительное обслуживание эволюционирует в сторону предиктивной аналитики. Датчики передают данные о вибрации, температуре и других параметрах, а алгоритмы машинного обучения прогнозируют вероятные отказы, минимизируя внеплановые простои [6, 15].

Poka-Yoke 4.0 (защита от ошибок). Классические пока-ёкэ представляли собой механические приспособления, физически не позволявшие собрать деталь неправильно. Сегодня системы компьютерного зрения и RFID-метки создают «умные» защиты. Камеры контролируют правильность сборки в реальном времени, а при обнаружении отклонения система либо блокирует дальнейшие операции, либо выводит оператору инструкции по исправлению в дополненной реальности [11, 15].

Lean Six Sigma 4.0 **(бережливое производство + шесть сигм)**. Ранее этот подход основывался на статистическом анализе ограниченных выборок данных, собранных вручную. Сегодня интеграция с большими данными позволяет выявлять скрытые закономерности в процессах, недоступные при классическом анализе. Интеллектуальный анализ данных автоматически определяет факторы, влияющие на появление дефектов, и предлагает оптимальные настройки оборудования для их предотвращения [6, 12].

JIT 4.0 (точно вовремя). Классический JIT требовал ручного планирования для минимизации запасов. На сегодняшний день, благодаря IoT и облачным платформам, JIT 4.0 обеспечивает автоматическую синхронизацию производства с движением материалов. Датчики и RFID-метки инициируют

запуск операций при достижении заданного порога. Это позволяет сократить запасы до минимума и мгновенно реагировать на изменения спроса, исключая простои и перепроизводство [6, 15].

Kaizen 4.0 (непрерывное улучшение). Традиционный кайдзен требовал значительных временных затрат на сбор данных. В эпоху Lean 4.0 аналитика больших данных и машинное обучение в реальном времени выявляют скрытые узкие места. Система автоматически генерирует рекомендации по улучшению, а цифровые платформы позволяют сотрудникам отслеживать реализацию идей. Это смещает фокус с периодических мероприятий на непрерывный, управляемый данными процесс улучшений [4, 6].

Как видно из приведенных примеров, цифровая трансформация затронула практически все ключевые инструменты бережливого производства, наделяя их новыми возможностями – от мониторинга в реальном времени до предиктивной аналитики. Среди этого многообразия особое место занимает методология 5S. Несмотря на свою фундаментальную роль в организации рабочего пространства и повсеместное признание в качестве первого шага на пути к бережливому производству, 5S остается наименее исследованной в контексте Lean 4.0. Как показал проведенный систематический обзор литературы, количество фундаментальных исследований в этой области невелико. Однако следует отметить, что отдельные промышленные компании и исследовательские коллективы уже предприняли успешные шаги по внедрению цифровых решений для поддержки 5S, что подтверждает практическую востребованность данного направления. Рассмотрим два наиболее показательных промышленных кейса, которые демонстрируют реальные примеры цифровой трансформации 5S.

Первый подход – IIoT-архитектура для поддержания 5S. В работе Песаша с соавторами [10] представлена модульная архитектура «5S 4.0», ориентированная на этапы Стандартизации (Seiketsu) и Совершенствования (Shitsuke). Разработанный прототип, прошедший апробацию в контролируемых промышленных условиях, с помощью низкопороговых датчиков отслеживает состояние инструментов и взаимодействие операторов, а данные визуализируются через операционные дашборды и периодические отчеты.

Второй подход – автоматизация аудита 5S. В работе Масиэла и Вералдо [8] предлагается система на основе больших языковых моделей (LLM), внедренная на предприятиях автомобильной промышленности. Система анализирует изображения рабочих мест и автоматически оценивает соблюдение пяти принципов 5S. Результаты промышленного внедрения показали сокращение времени аудита на 50% и снижение операционных затрат на 99,8% при высокой точности оценок ($\kappa = 0{,}75$).

Признавая достоинства и практическую ценность рассмотренных решений, можно отметить, что оба подхода обладают общим ограничением: они ориентированы либо на контроль соблюдения уже существующей организации рабочего пространства, либо на автоматизацию аудита. В первом

случае система фиксирует, находится ли инструмент на месте, но не помогает определить оптимальное место для него. Во втором случае система оценивает соблюдение правил, но не генерирует рекомендации по улучшению компоновки.

Таким образом, ни одно из рассмотренных решений не предлагает методов для автоматической оптимизации физической компоновки рабочего места на основе объективных данных о частоте использования предметов и эргономических критериях. Данный пробел определяет направление исследований коллектива авторов настоящей статьи.

Для восполнения выявленного пробела предлагается концепция Digital 5S – AI-ассистированной модели персонализации рабочего пространства, модульная структура которой представлена на рисунке. В отличие от существующих подходов, ориентированных на контроль и оценку, предлагаемая концепция обеспечивает полный цикл цифровой трансформации 5S.

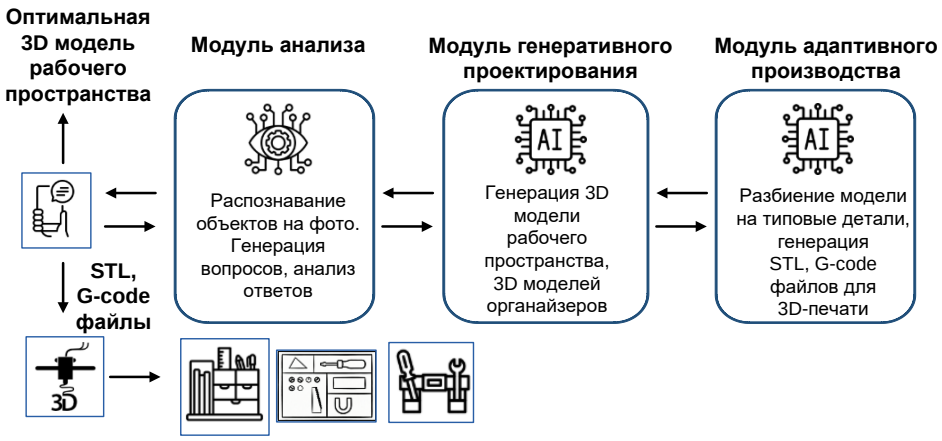


Рис. AI-ассистированная модель персонализации рабочего пространства

Модуль анализа. На основе фотографий рабочей зоны и диалога с пользователем система с применением компьютерного зрения идентифицирует предметы, их приблизительные габариты и предлагает их ранжирование по частоте использования. На этом этапе собираются объективные данные для проектирования.

Модуль генеративного проектирования. Искусственный интеллект, используя данные из первого модуля и точные размеры рабочего пространства, генерирует оптимальную 3D-модель рабочего пространства и необходимых органайзеров. Алгоритмы содержат принципам эргономики: приоритет доступа, группировка по функции, удобство извлечения и возврата. Утверждённая пользователем модель становится цифровым стандартом для данного рабочего места.

Модуль адаптивного производства. Система автоматически адаптирует модель под технологические ограничения 3D-печати, разбивая её на типовые детали и проектируя систему соединений. Пользователь получает готовые файлы (STL, G-code) для изготовления требуемых органайзеров.

При изменении условий система позволит быстро модифицировать цифровой стандарт и произвести новый элемент, реализуя принцип цифрового совершенствования.

В ходе проведенного исследования была разработана концепция Digital 5S – AI-ассистированной модели персонализации рабочего пространства в рамках концепции Lean 4.0, Актуальность работы обусловлена активной цифровой трансформацией инструментов бережливого производства и относительно малым количеством фундаментальных исследований, направленных на цифровизацию методологии 5S, являющейся базовым инструментом организации эффективного рабочего пространства.

Предложенная концепция Digital 5S, обеспечивает полный цикл цифровой трансформации методологии: анализ содержимого рабочего пространства с помощью компьютерного зрения, оптимизацию компоновки на основе генеративного дизайна с учетом частоты использования предметов и эргономических критериев, а также материализацию стандарта посредством 3D-печати. В отличие от существующих аналогов, предлагаемая модель нацелена не на констатацию нарушений, а на создание оптимальной, эргономичной и персонализированной организации рабочего пространства.

Дальнейшая реализация предложенной концепции требует решения ряда задач. На первом этапе необходимо создать и обучить модель компьютерного зрения для распознавания типовых предметов на рабочих местах по фотографиям, а также разработать алгоритм калибровки для определения реальных габаритов предметов с использованием эталонного объекта. На втором этапе требуется формализовать задачу многокритериальной компоновки рабочего пространства и разработать алгоритмы генеративного дизайна для автоматического создания 3D-модели органайзера. На третьем этапе – создать модуль адаптивного разбиения модели на части, генерирующий соединения для 3D-печати на стандартных FDM-принтерах.

Таким образом, предложенная концепция Digital 5S создает основу для разработки программного продукта, автоматизирующего проектирование 3D-модели оптимального рабочего пространства и персонализированных органайзеров как материализации цифрового стандарта, что позволит повысить эффективность использования рабочих мест. Перспективными направлениями будущих исследований являются создание действующего прототипа системы и его апробация в реальных производственных условиях.

Список литературы

1. Азаров В.Н. Цифровая трансформация государства, экономики, общества, человека: монография / В.Н. Азаров, Е.Л. Кузина, А.В. Чекмарев; под общ. ред. В.Н. Азарова. – Москва: Фонд «Европейский центр по качеству», 2025. – 580 с. – ISBN 978-5-94768-080-5. – DOI: 10,31145/978-5-94768-080-5-2025.

2. ГОСТ Р 56906-2016. Бережливое производство. Организация рабочего пространства (5S). – Москва: Стандартинформ, 2016. – 16 с.

3. Крамаренко Н.С. Совместимость Индустрии 4.0 с моделью управления «Бережливое производство» и модернизация концепции в эпоху цифровизации / Н.С. Крамаренко. – Москва: Дипломатическая академия МИД России, 2024. – С. 89–96.

4. Хирано Х. 5S для рабочих: как улучшить свое рабочее место / Х. Хирано. – Москва: Институт комплексных стратегических исследований, 2015. – 160 с.

5. Boston Consulting Group. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries / Boston Consulting Group. – 2015. – 20 p.

6. Buer S.V. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda / S.V. Buer, J.O. Strandhagen, F.T.S. Chan // International Journal of Production Research. – 2018. – Vol. 56, No. 8. – P. 2924–2940,

7. Kagermann H. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0 / H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig. – Frankfurt: acatech, 2013. – 82 p.

8. Maciel R.S. Intelligent 5S Audit: Application of Artificial Intelligence for Continuous Improvement in the Automotive Industry / R.S. Maciel, L. Veraldo Jr. // arXiv preprint arXiv:2510,00067. – 2025.

9. Mrugalska B. Towards Lean Production in Industry 4.0 / B. Mrugalska, M.K. Wyrwicka // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 182. – P. 466–473.

10. Peças P. 5S Sustainment with Industry 4.0 Technologies: A Practical IIoT Architecture for Real Time Visibility and Traceability / P. Peças, M. Batalha, R. Febra, L.C. Oliveira, D. Jorge // Elsevier BV. – 2026. – Posted Content.

11. Sharah Qistina. Investigating the impact of lean practices and industry 4.0 technologies towards operational performance / Sharah Qistina, Shari Fuzzaman, Noraini Mohd Razali, Kartina Johan // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2025. – P. 65–74.

12. Sony M. Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions / M. Sony // Production & Manufacturing Research. – 2018. – Vol. 6, No. 1. – P. 416–432.

13. Tashkinov A.G. The impact of Lean Manufacturing and Industry 4.0 on the Efficient Operation of an Enterprise / A.G. Tashkinov // International Journal of Management and Humanities. – 2024. – Vol. 10, No. 11. – P. 7–12. – DOI: 10,35940/ijmh.F4515.10110724.

14. Tortorella G.L. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies / G.L. Tortorella, D.C. Fettermann // International Journal of Production Research. – 2018. – Vol. 56, No. 8. – P. 2975–2987.

15. Valamede L.S. Lean 4.0: A New Holistic Approach for the Integration of Lean Manufacturing Tools and Digital Technologies / L.S. Valamede, A.C.S. Akkari // International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences. – 2020, – Vol. 5, No. 5. – P. 851–868. – DOI: 10,33889/IJMEMS.2020,5.5.066.

Abimolda I.S.
Student
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov
Kazakhstan, Karaganda
abimoldainabat05@gmail.com
Baibula N.Z.
Student
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov
Kazakhstan, Karaganda
nurdanabaibala@gmail.com
Karimova Z.N.
Lecturer of the Department of Translation Theory and Practice
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov
Kazakhstan, Karaganda

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN IMPROVING THE QUALITY OF ENGLISH LANGUAGE TEACHING: THE POTENTIAL OF MOBILE APPLICATIONS

Abstact. This article explores innovative technologies in improving the quality of English language teaching: the potential of mobile applications. During the study, the applications Duolingo, Quizlet, LanGeek and Cake were reviewed, and their comparative evaluation was carried out in order to determine the most effective tools.

Keywords: digital education, mobile applications, English language teaching, linguodidactics, language skills.

The contemporary education system is undergoing significant changes under the influence of rapid digital development. These changes affect not only the use of technological tools in classrooms but also transform the overall approach to teaching and learning. In particular, foreign language education has been notably influenced by the growing use of mobile applications and digital platforms. Modern learners are closely connected to digital technologies[Godwin-Jones Robert, R], especially smartphones, which have become an essential part of their daily lives. As a result, mobile applications are increasingly used as practical and accessible tools for language learning. They provide flexibility, allowing learners to study anytime and anywhere. At the same time, an important issue arises: do these applications genuinely contribute to language development, or do they mainly serve as a form of entertainment? The purpose of this study is to examine this issue and evaluate the effectiveness of mobile applications in English language learning. Special attention is given to their role in increasing learner motivation, supporting independent study, and developing essential language skills.

Linguodidactics [Kukulska-Hulme Agnes, A], as a scientific field, focuses on the principles and methods of teaching foreign languages. In the context of digital education, its role has increased significantly. Modern approaches focus not only on mastering grammar and vocabulary, but also on the ability to use language in real communicative situations. Therefore, learning tools should create

opportunities for constructive interaction and practical application. Mobile applications, when used correctly, have a number of important advantages that correspond to modern educational approaches. They promote active participation, as Students are directly involved in the learning process, rather than passively accepting information. In addition, the use of multimedia elements such as audio and video contributes to a better understanding and memorization of the material. Another important feature is the use of gamification. Game elements help to keep Students interested and promote regular practice. Mobile applications also support offline learning, allowing users to control their own pace and focus on individual learning needs. In addition, instant feedback allows Students to quickly recognize and correct their mistakes, which helps improve learning effectiveness. These functions create favorable conditions for the development of four basic language skills: listening, speaking, reading and writing. However, it should be noted that not all applications support these skills equally, which makes their assessment particularly important.

This study is based on[Kukulska-Hulme Agnes, A] a comparative analytical approach. Four widely used mobile applications – Duolingo [1], Quizlet [2], LanGeek, and Cake – were selected for analysis due to their popularity among English language learners. Each application was evaluated according to four key criteria: vocabulary development, grammar instruction, speaking skills, and motivational design. The analysis is based on direct observation of the applications as well as general pedagogical principles related to Mobile Assisted Language Learning (MALL).

Duolingo – Gamified Language Learning

Duolingo is one of the most popular language learning apps worldwide, with a large number of users. His approach is based on gamification, which turns learning into an interactive and exciting process. One of Duolingo's main strengths is its ability to stimulate consistent learning through the streak system, which motivates users to practice daily. The app combines vocabulary and grammar in contextual exercises, making it especially suitable for beginners. In addition, the structured course design provides a clear learning path that Students can follow on their own. Despite these advantages, Duolingo has certain limitations. The development of oral speech skills is relatively weak, as most assignments focus on written responses and text recognition. Moreover, some exercises may be repeated, which may reduce the depth of learning. :Duolingo is very effective for elementary level Students and serves as a powerful motivational tool. However, at higher levels, it should be complemented by other resources that provide more opportunities for communication.

Quizlet – a vocabulary learning tool

Quizlet is a digital platform designed primarily for learning vocabulary using flashcards and memorization-based methods.The application is very effective for acquiring vocabulary through the use of repetition and active memorization. It offers various learning modes, including flashcards, relevant assignments, and tests that help consolidate the knowledge gained. Quizlet is also a useful tool for

teachers, as it allows them to create customized learning materials and share them. However, Quizlet is not aimed at developing conversational skills and often presents vocabulary without sufficient context. This may limit Students' ability to use new words in real communication. Quizlet is an effective tool for memorizing and reviewing vocabulary, but it is better to use it as an additional resource rather than as a complete solution for learning a language.

Cake is a language-learning application based on real-life communication.

It stands out significantly from other platforms because its content and structure are derived from authentic, everyday contexts. Grammar is presented in an engaging way, with explanations provided in each section. This methodology contributes to vocabulary development and enables learners to analyze language from a more advanced linguistic perspective. The application divides English into general and academic categories. Academic grammar is explained through excerpts from real-life university lectures delivered by professors, which enhances learners' understanding of how grammar functions in authentic contexts. The material may be challenging for beginner-level learners, whereas intermediate Students can adapt and progress more quickly.

LanGeek is a highly effective application for English learners, particularly for expanding vocabulary.

It contains over 10,000 words, each categorized and supported with images and example sentences. In addition, learners can listen to the correct pronunciation of each word, which helps improve listening skills. The platform also includes idiomatic expressions and even advanced C2-level vocabulary. Beyond vocabulary learning, LanGeek offers grammar sections as well. Furthermore, it provides analyses of well-known English books, where learners can see translations or definitions of words used in the texts (fig.).

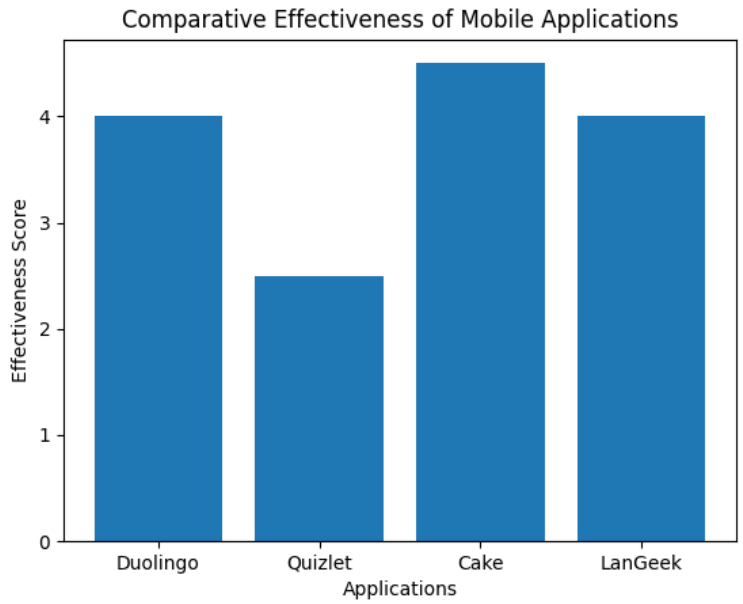


Fig. Comparative effectiveness of mobile applications

As shown in the result, we selected Duolingo and Cake as the most effective applications for learning English. Considering that linguistics and phonetics are complex and advanced fields, these platforms present the material in a simplified and engaging way, making the learning process more accessible and interesting.

Consistency is one of the most important factors in language learning. These applications help learners maintain focus and regular practice, while simultaneously introducing the subtle nuances of the English language. In particular, Cake and Duolingo effectively combine engagement with linguistic depth, allowing learners to develop their skills in a structured yet motivating environment.

References

1. Duolingo. (2024). Official website. Available at: https://www.duolingo.com
2. Quizlet. (2024). Official website. Available at: https://quizlet.com
3. Cake. (2024). Official website. Available at: https://mycake.me
4. LanGeek. (2024). Official website. Available at: https://langeek.com
5. Godwin-Jones Robert, R. (2011). Emerging technologies: Mobile apps for language learning. Language Learning & Technology, 15(2), 2–11.
6. Kukulska-Hulme Agnes, A. (2013). Mobile-assisted language learning. In: The Encyclopedia of Applied Linguistics.

Елисеева Н.В.
к.т.н., доцент кафедры УИТС
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
n.eliseeva@stankin.ru
Алёшин К.П.
студент
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
04kirill@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА И ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. Оценка алгоритмической сложности программного кода является важной задачей при разработке программных систем, поскольку позволяет определить, как изменяются вычислительные затраты алгоритма при увеличении объёма входных данных. На практике такая оценка часто выполняется вручную, требует специальных знаний и зависит от опыта разработчика. Это затрудняет своевременное выявление фрагментов программы, которые могут стать причиной снижения производительности при росте объёма обрабатываемых данных. Существующие инструменты анализа программного кода преимущественно ориентированы на выявление синтаксических ошибок, дефектов, уязвимостей и нарушений стиля. При этом специализированная оценка алгоритмической

сложности отдельных программных фрагментов обычно не является их основной функцией. Отдельные AI-сервисы могут использоваться для анализа кода, однако требуют ручной передачи фрагментов программы и не всегда учитывают структурный контекст проекта. В статье рассматривается подход к автоматизированной оценке алгоритмической сложности программного кода на основе сочетания структурного анализа и языковой модели. Структурный анализ используется для выделения логических блоков программы и определения их взаимосвязей, а языковая модель применяется для интерпретации полученного контекста и формирования оценки сложности. Предлагаемый подход предполагает представление результатов анализа непосредственно в среде редактора кода, что позволяет локализовать потенциально неэффективные участки и предоставить пользователю общую характеристику алгоритмической эффективности программы.

Ключевые слова: алгоритмическая сложность, Big O, статический анализ кода, структурный анализ программы, языковая модель, интеллектуальный редактор кода.

Eliseeva N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of MITS
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
n.eliseeva@stankin.ru
Aleshin K.P.
Student
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
04kirill@mail.ru

AUTOMATED EVALUATION OF ALGORITHMIC COMPLEXITY OF PROGRAM CODE USING STRUCTURAL ANALYSIS AND LANGUAGE MODEL

Abstact. Evaluating the algorithmic complexity of a program code is an important task in the development of software systems, since it allows us to determine how the computational costs of an algorithm change with an increase in the amount of input data. In practice, such an assessment is often performed manually, requires special knowledge, and depends on the developer's experience. This makes it difficult to identify program fragments in a timely manner that may cause performance degradation as the volume of processed data increases. Existing software code analysis tools are primarily focused on detecting syntax errors, defects, vulnerabilities, and style violations. At the same time, specialized evaluation of the algorithmic complexity of individual program fragments is usually not their main function. Individual AI services can be used for code analysis, but require manual transmission of program fragments and do not always consider the structural context of the project. The article discusses an approach to automated evaluation of the algorithmic complexity of software code based on a combination of structural analysis and a language model. Structural analysis is used to identify the logical blocks of the program and determine their relationships, and the language model is used to interpret the resulting context and form an assessment of complexity. The proposed approach involves presenting the analysis results directly in the environment of the code editor, which allows you to localize potentially inefficient areas and provide the user with a general description of the algorithmic effectiveness of the program.

Keywords: algorithmic complexity, Big O, static code analysis, structural program analysis, language model, intelligent code editor.

В современных условиях разработки программного обеспечения всё большее значение приобретает не только функциональная корректность программного кода, но и его вычислительная эффективность. При увеличении объёма обрабатываемых данных даже корректно работающий алгоритм может оказаться непригодным для практического применения, если его время выполнения или потребление памяти растут слишком быстро. Поэтому оценка алгоритмической сложности является важным этапом анализа программного кода, позволяющим заранее определить потенциальные ограничения масштабируемости разрабатываемого решения [1].

На практике оценка алгоритмической сложности часто выполняется вручную. Разработчик анализирует структуру программы, определяет вложенность циклов, условия выполнения отдельных фрагментов, характер обращения к данным и взаимосвязь между программными блоками. Такой подход требует определённого опыта и теоретической подготовки, поскольку одинаковые на первый взгляд конструкции могут иметь различную сложность в зависимости от логики алгоритма, структуры входных данных и особенностей взаимодействия функций [2]. В результате начинающим разработчикам может быть сложно самостоятельно определить сложность программного фрагмента и понять, какие участки кода потенциально требуют оптимизации.

Существующие инструменты анализа программного кода решают данную задачу лишь частично. Статические анализаторы позволяют выявлять синтаксические ошибки, дефекты, уязвимости, нарушения стиля программирования и отдельные признаки неэффективного кода [5]. Однако их работа, как правило, основана на заранее заданных формальных правилах, что ограничивает возможность интерпретации более сложных алгоритмических конструкций. Отдельные AI-сервисы и интеллектуальные помощники могут использоваться для объяснения кода и получения рекомендаций, но в большинстве случаев требуют ручной передачи фрагментов программы и не обеспечивают полноценного анализа структуры проекта непосредственно в процессе редактирования [7].

В связи с этим актуальной становится разработка подхода, который объединяет преимущества структурного анализа исходного кода и возможностей языковых моделей [7]. Структурный анализ позволяет выделить логические элементы программы: функции, циклы, условные операторы, вложенные блоки и связи между ними [4]. Языковая модель, в свою очередь, может использоваться для интерпретации полученного контекста и формирования человеко-ориентированного объяснения оценки сложности. Такое сочетание позволяет перейти от простой проверки кода по формальным правилам к более гибкому анализу программных фрагментов.

В рамках данной статьи рассматривается подход к автоматизированной оценке алгоритмической сложности программного кода с использованием структурного анализа и языковой модели. Предполагается, что исходный

код предварительно разбивается на логические блоки, после чего для каждого значимого фрагмента формируется контекст, необходимый для оценки сложности. Результаты анализа могут быть представлены пользователю в среде редактора кода в виде визуальных пометок и общего заключения об алгоритмической эффективности программы.

Целью статьи является описание подхода к автоматизированной оценке алгоритмической сложности программного кода, основанного на сочетании структурного анализа и языковой модели. Для достижения данной цели рассматриваются особенности ручной оценки сложности, ограничения существующих средств анализа кода, а также предлагается архитектурная схема решения, позволяющего локализовать потенциально неэффективные участки программы и повысить доступность анализа алгоритмической эффективности для пользователя.

Методология работы основана на сочетании методов статического анализа программного кода и интеллектуальной интерпретации его структуры с использованием языковой модели [7]. В рамках предлагаемого подхода исходный код рассматривается не как единый текстовый фрагмент, передаваемый на анализ целиком, а как совокупность логически связанных программных блоков. Такой подход позволяет учитывать внутреннюю структуру программы и выполнять оценку алгоритмической сложности не только для всего файла, но и для отдельных участков кода.

На первом этапе выполняется структурный анализ исходного кода. Его задача заключается в выделении основных элементов программы: функций, циклов, условных операторов, вложенных блоков и других конструкций, влияющих на вычислительные затраты алгоритма [4]. Особое внимание уделяется конструкциям, которые непосредственно связаны с ростом количества операций при увеличении объёма входных данных: последовательным и вложенным циклам, рекурсивным вызовам, операциям перебора коллекций, сортировке и обращениям к вспомогательным структурам данных [3].

На втором этапе для выделенных программных блоков формируется контекст анализа. В него могут входить исходный код рассматриваемого фрагмента, сведения о его положении в общей структуре файла, информация о вложенности конструкций, а также связи с другими функциями или блоками программы. Формирование такого контекста необходимо для того, чтобы языковая модель получала не изолированный участок текста, а структурированное представление фрагмента программы [7]. Это снижает вероятность поверхностной оценки сложности и позволяет учитывать особенности взаимодействия отдельных частей кода.

На третьем этапе выполняется оценка алгоритмической сложности. Для простых и формально определяемых случаев возможно применение статических правил: например, линейный цикл по массиву может быть отнесён к сложности $O(n)$, а два вложенных цикла – к сложности $O(n^2)$ [1]. Однако при анализе более сложных конструкций, где результат зависит от

логики выполнения, условий выхода, характера рекурсии или взаимодействия нескольких функций, используется языковая модель. Её задача заключается в интерпретации сформированного контекста и определении предполагаемой асимптотической оценки сложности [6].

В рамках данной работы основное внимание уделяется временной сложности алгоритма, поскольку она непосредственно отражает рост количества вычислительных операций при увеличении размера входных данных. В качестве основной формы представления результата используется нотация Big O, позволяющая оценить верхнюю границу роста вычислительных затрат. Дополнительно при необходимости могут рассматриваться оценки Big Ω и Big Θ, однако в пользовательском интерфейсе приоритет отдаётся наиболее распространённой и понятной оценке Big O.

Для практической реализации предлагаемого подхода рассматривается прототип десктопного редактора кода. В качестве основного языка разработки выбран Python, поскольку он позволяет быстро реализовывать прототипы программных систем и имеет развитую экосистему библиотек для работы с анализом кода и пользовательскими интерфейсами. Для построения графического интерфейса используется PySide6, а в качестве компонента редактора кода рассматривается QtMonaco. Структурный анализ программного кода предполагается выполнять с использованием tree-sitter, обеспечивающего построение синтаксического дерева и выделение логических элементов программы [10]. Взаимодействие с языковой моделью реализуется через Ollama, что позволяет запускать модель локально и передавать ей подготовленный контекст анализа. В качестве модели для интерпретации программного кода рассматривается Qwen2.5-Coder:7B [8].

Предлагаемая архитектура включает несколько основных компонентов: модуль редактора кода, модуль структурного анализа, модуль формирования контекста, модуль взаимодействия с языковой моделью и модуль визуализации результатов. Пользователь работает с исходным кодом в среде редактора, после чего система автоматически анализирует структуру программы, выделяет значимые фрагменты и формирует запрос к языковой модели. Полученные оценки сложности отображаются непосредственно в интерфейсе редактора в виде визуальных пометок рядом с соответствующими фрагментами кода, а также могут обобщаться в виде общего заключения об алгоритмической эффективности программы.

Таким образом, методология работы предполагает переход от ручного анализа алгоритмической сложности к полуавтоматизированному процессу, в котором структурный анализ обеспечивает формальное представление программы, а языковая модель используется для интерпретации сложных или неоднозначных фрагментов. Такое сочетание позволяет повысить доступность оценки алгоритмической эффективности и сделать результаты анализа более наглядными для пользователя.

В результате проведённой работы был сформирован подход к автоматизированной оценке алгоритмической сложности программного кода, основанный на сочетании структурного анализа и языковой модели. Предлагаемый подход позволяет рассматривать исходный код не только как текстовую последовательность, но и как структурированное представление, включающее функции, циклы, условные операторы, вложенные блоки и связи между ними [5]. Это создаёт основу для более точной локализации участков программы, влияющих на рост вычислительных затрат.

Одним из основных результатов является разработка архитектуры системы автоматизированной оценки алгоритмической сложности. В её состав входят модуль редактирования кода, модуль структурного анализа, модуль формирования контекста, модуль взаимодействия с языковой моделью и модуль визуализации результатов. Такое разделение позволяет разграничить задачи обработки исходного кода, подготовки данных для анализа и представления результата пользователю.

Модуль структурного анализа предназначен для выделения логических программных блоков, которые могут влиять на алгоритмическую сложность. К таким блокам относятся циклы, вложенные циклы, рекурсивные вызовы, функции, операции перебора коллекций и другие конструкции, определяющие зависимость времени выполнения от размера входных данных [1]. За счёт предварительного структурного анализа языковая модель получает не произвольный фрагмент текста, а подготовленный контекст, содержащий сведения о положении анализируемого блока в программе и его связи с другими элементами кода.

В рамках предложенного подхода была определена последовательность обработки программного кода. Сначала пользователь открывает или редактирует файл в среде редактора. Затем система выполняет структурный анализ исходного кода и выделяет значимые фрагменты. После этого для каждого фрагмента формируется контекст, включающий исходный код блока, сведения о вложенности и информацию о связанных конструкциях. Подготовленный контекст передаётся языковой модели, которая формирует оценку алгоритмической сложности и краткое пояснение результата [9]. Полученные данные возвращаются в редактор и отображаются рядом с соответствующими участками программы.

В качестве основной формы представления результата используется оценка временной сложности в нотации Big O. Такой выбор обусловлен тем, что Big O позволяет показать верхнюю границу роста вычислительных затрат и является наиболее распространённым способом описания алгоритмической эффективности [3]. Для пользователя результат может быть представлен в виде визуальных пометок рядом с программными фрагментами, например $O(1)$, $O(n)$, $O(n^2)$, $O(\log n)$, а также в виде общего заключения о наиболее значимых с точки зрения производительности участках программы.

Практическим результатом предложенного подхода является возможность представить оценку алгоритмической сложности непосредственно в процессе работы с исходным кодом. В отличие от ручного анализа, пользователь получает подсказку в среде редактора, без необходимости самостоятельно выделять фрагмент программы и передавать его во внешний сервис. Это особенно важно для студентов и начинающих разработчиков, которым может быть сложно самостоятельно определить зависимость времени выполнения алгоритма от размера входных данных [6].

Таким образом, результатом работы является не только архитектурное описание системы, но и формализация последовательности автоматизированного анализа программного кода: от выделения структурных элементов до получения оценки сложности и её отображения пользователю. Предложенный подход может быть использован как основа для разработки инструмента, повышающего доступность анализа алгоритмической эффективности программ.

Список литературы

1. Cormen T.H. Introduction to Algorithms / T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, C. Stein. 4th ed. Cambridge: The MIT Press, 2022. 1312 p.
2. Knuth D.E. The Art of Computer Programming. Vol. 1: Fundamental Algorithms / D.E. Knuth. 3rd ed. Boston: Addison-Wesley, 1997. 672 p.
3. Sedgewick R. Algorithms / R. Sedgewick, K. Wayne. 4th ed. Boston: Addison-Wesley, 2011. 976 p.
4. Nielson F. Principles of Program Analysis / F. Nielson, H.R. Nielson, C. Hankin. Berlin: Springer, 1999. 452 p.
5. Moller A. Static Program Analysis / A. Moller, M.I. Schwarzbach. Текст: электронный // Department of Computer Science, Aarhus University: [сайт]. 2024. URL: https://cs.au.dk/~amoeller/spa/ (дата обращения: 26.04.2026).
6. Baik S.-Y. CodeComplex: A Time-Complexity Dataset for Bilingual Source Codes / S.-Y. Baik, M. Jeon, J. Hahn [и др.]. Текст: электронный // arXiv: [сайт]. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2401.08719 (дата обращения: 27.04.2026).
7. Zheng Z. A Survey of Large Language Models for Code: Evolution, Benchmarking, and Future Trends / Z. Zheng, K. Ning, Y. Wang [и др.]. Текст: электронный // arXiv: [сайт]. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2311.10372 (дата обращения: 28.04.2026).
8. Hui B. Qwen2.5-Code Technical Report / B. Hui, J. Yang, Z. Cui [и др.]. Текст: электронный // arXiv: [сайт]. 2024. URL: https//arxiv.org/abs/2308.12950 (дата обращения: 29.04.2026).
9. Chambon P. BigO(Bench) – Can LLMs Generate Code with Controlled Time and Space Complexity? / P. Chambon, B. Roziere, B. Sagot [и др.]. Текст: электронный // arXiv: [сайт]. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2503.15242 (дата обращения: 28.04.2026).
10. Clem T. Static Analysis at GitHub / T. Clem, P. Thomson // Communications of the ACM. 2022. Vol. 65, No. 2. P. 44–51. DOI: https://doi.org/10,1145/3486594 (дата обращения: 29.04.2026).

Денисенко С.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
stefaniadenisenko@yandex.ru
Богдасарян Л.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
bogdasaryan.leon@mail.ru
Миронов Г.С.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
grishamironov2006@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ ЗАТРАТАМИ НА УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. В современной рыночной экономике качество продукции и услуг является одним из главных факторов конкурентоспособности. Однако обеспечение и поддержание качества требует определённых затрат, которые необходимо планировать, учитывать и оптимизировать. Данная работа посвящена анализу структуры затрат на управление качеством, их классификации и влиянию на результативность организации. Рассмотрены основные теоретические модели, включая PAF-модель (затраты на предупреждение, оценку, внутренние и внешние потери). Приведены примеры практического снижения затрат без потери качества на основе открытых данных. Показана роль стандарта ISO 9001:2015 и рискориентированного подхода в оптимизации расходов. Материал статьи может быть полезен студентам, изучающим менеджмент качества, а также специалистам, занимающимся рационализацией расходов на системы менеджмента качества.

Ключевые слова: управление качеством, затраты на качество, система менеджмента качества, ISO 9001, PAF-модель, оптимизация затрат, бережливое производство.

Denisenko S.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
stefaniadenisenko@yandex.ru
Bogdasaryan L.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
bogdasaryan.leon@mail.ru
Mironov G.S.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
grishamironov2006@gmail.com

COST MANAGEMENT FOR QUALITY MANAGEMENT

Abstact. In today's market economy, the quality of products and services is one of the key factors of competitiveness. However, ensuring and maintaining quality requires certain costs that must be planned, accounted for, and optimized. This paper analyzes the structure of quality management costs, their classification, and their impact on organizational performance. The main theoretical models are examined, including the PAF model (costs of prevention, appraisal, internal failures, and external failures). Examples of practical cost reduction without loss of quality are provided based on open data. The role of the ISO 9001:2015 standard and the risk-based approach in cost optimization is demonstrated. The material of the article may be useful for Students studying quality management, as well as for specialists involved in rationalizing expenditures on quality management systems.

Keywords: quality management, cost of quality, quality management system, ISO 9001, PAF model, cost optimization, lean manufacturing.

В условиях глобальной конкуренции и постоянного ужесточения требований потребителей качество продукции и услуг перестало быть просто желательным атрибутом. Оно превратилось в обязательное условие выживания и устойчивого развития предприятия. В ответ на этот вызов большинство компаний внедряют системы менеджмента качества (СМК), сертифицированные по стандартам ISO 9001, инвестируют в обучение персонала, автоматизацию контроля и метрологическое обеспечение. Однако при этом часто упускается из виду, что сама деятельность по управлению качеством является существенной статьёй расходов.

Эти расходы – затраты на управление качеством – требуют не менее тщательного учёта и оптимизации, чем затраты на сырьё или энергию. Их неконтролируемый рост может свести на нет все преимущества от повышения качества. Поэтому целью данной статьи является систематизация знаний о природе и структуре затрат на управление качеством, а также выработка практических рекомендаций по их оптимизации без снижения результативности СМК.

Практика работы многих предприятий показывает, что затраты на управление качеством зачастую не выделяются в отдельную категорию управленческого учёта. Они «растворяются» в общепроизводственных, административных или накладных расходах. Это приводит к тому, что руководство не имеет объективной информации об эффективности вложений в СМК. В результате возникают избыточные, дублирующие процессы контроля, неоправданно высокие расходы на документооборот и аудиты, а также снижается гибкость системы.

Особую остроту проблема приобретает в условиях экономической нестабильности, когда предприятия вынуждены сокращать издержки. Часто под сокращение первыми попадают именно мероприятия по управлению качеством – обучение, профилактика, аудиты. Это приводит к росту брака и рекламаций, что в итоге обходится дороже. Таким образом, актуальность

темы заключается в необходимости найти баланс между уровнем качества и затратами на его обеспечение.

В теории менеджмента качества наибольшее распространение получила так называемая PAF-модель (Prevention, Appraisal, Failure). Она была предложена ещё в 1950-х годах и до сих пор является основой для большинства методик учёта. Согласно этой модели, все затраты на качество делятся на четыре категории.

Первая категория – затраты на предупреждение (prevention). Это инвестиции в мероприятия, которые должны предотвратить появление дефектов. К ним относятся: проектирование качественных процессов, обучение персонала методам качества, профилактическое обслуживание оборудования, закупка надёжных средств измерения. Считается, что увеличение доли предупредительных затрат ведёт к снижению общих потерь.

Вторая категория – затраты на оценку (appraisal). Это расходы на контроль и проверку продукции: входной контроль сырья, операционный контроль в процессе производства, испытания готовой продукции, поверка измерительного оборудования. Эти затраты не предотвращают брак, а лишь выявляют его, поэтому их чрезмерное наращивание неэффективно.

Третья категория – внутренние потери (internal failure). Сюда относятся убытки от дефектов, обнаруженных до отправки продукции потребителю: переделка брака, утилизация, простои, пересортица.

Четвёртая категория – внешние потери (external failure). Это наиболее опасный вид затрат: рекламации, гарантийный ремонт, штрафы, потеря репутации и падение продаж.

Классические работы Ф. Кросби и У.Э. Деминга показывают, что долгосрочная стратегия, основанная на приоритете предупредительных затрат, всегда выгоднее, чем фокус на контроле и исправлении брака.

В рамках современных СМК, построенных по стандарту ISO 9001:2015, всё большее значение приобретают управленческие аспекты качества. Затраты на управление качеством – это часть общих затрат на качество, но они относятся не к конкретному продукту, а к функционированию системы в целом. К ним можно отнести:

1.расходы на разработку, внедрение и поддержание документации СМК;

2.затраты на проведение внутренних и внешних аудитов;

3.оплату труда сотрудников, занятых управлением качеством (менеджеры по качеству, внутренние аудиторы);

4.расходы на сертификацию системы на соответствие ISO 9001;

5.затраты на обучение персонала принципам СМК и рискориентированному мышлению;

6.затраты на автоматизированные системы управления качеством (электронный документооборот, MES-системы).

Главная особенность этих затрат в том, что они не привязаны напрямую к объёму выпускаемой продукции и могут расти непропорционально, создавая избыточную бюрократическую нагрузку. Поэтому их оптимизация требует особого внимания.

Анализ открытых источников, в том числе публикаций портала «Качество.EUP» и материалов компании Lean Quality Systems, позволяет выделить несколько эффективных подходов к снижению затрат на управление качеством без ущерба для результативности.

Первый подход – внедрение принципов бережливого производства (Lean). Применение инструментов картирования потока создания ценности (VSM) позволяет выявить и устранить операции, не добавляющие ценности для потребителя. Например, излишние согласования документов, многократный ввод одних и тех же данных, дублирующие проверки. Сокращение таких операций снижает затраты на управление качеством на 10–15%.

Второй подход – автоматизация и цифровизация. Внедрение систем электронного документооборота (СЭД) вместо бумажных журналов и отчётов резко уменьшает время на администрирование. Использование статистического контроля процессов (SPC) в реальном времени позволяет выявлять отклонения без дорогостоящего тотального контроля. По данным открытых источников, автоматизация учёта затрат на качество снижает трудозатраты на 20–30%.

Третий подход – переход от тотального контроля к выборочному на основе рисков. Стандарт ISO 9001:2015 требует рискориентированного мышления. Это означает, что затраты на контроль следует концентрировать на критических точках процесса, где вероятность дефекта наиболее высока или последствия наиболее серьёзны. В остальных точках можно ослабить контроль или перейти на самоконтроль.

Четвёртый подход – интеграция обучения с реальными задачами. Вместо абстрактных семинаров целесообразно проводить адресное обучение, направленное на устранение конкретных причин несоответствий. Это повышает отдачу от затрат на обучение.

На портале «Качество.EUP» приводится опыт японских предприятий, где внедрение кружков качества и статистических методов позволило снизить затраты на управление качеством примерно на 12% при одновременном сокращении доли брака. Эффект достигался за счёт того, что рабочие сами предлагали упрощения процедур контроля, а менеджмент отказывался от избыточной отчётности.

Аналогичные данные публикует Lean Quality Systems: на одном из европейских машиностроительных заводов после внедрения электронной системы управления несоответствиями и автоматизации аудитов затраты на внутренние проверки снизились на 18%, а время на подготовку отчётов сократилось вдвое. При этом результативность СМК повысилась за счёт более быстрого принятия корректирующих мер.

Для иллюстрации возможного экономического эффекта рассмотрим гипотетическое предприятие. Исходные данные: себестоимость единицы продукции – 10 000 рублей, годовой выпуск – 50 000 штук. Общие затраты на качество составляют 12% от себестоимости, из них 3% – затраты на управление качеством (документирование, аудиты, обучение), 4% – затраты на контроль, 5% – потери от брака.

Предприятие решает оптимизировать затраты на управление качеством за счёт автоматизации документооборота и внедрения выборочного контроля на основе рисков. При этом удаётся сократить административные расходы на 20% (с 3% до 2,4% от себестоимости) и снизить затраты на контроль на 10% (с 4% до 3,6%). Благодаря более точному выявлению рисков брак также снижается с 5% до 4%. Новые общие затраты на качество: 2,4% + 3,6% + 4% = 10%. Экономия: 12% – 10% = 2% от себестоимости. В денежном выражении: 10 000 руб. × 0,02 × 50 000 шт. = 10 млн рублей в год. При этом результативность СМК не снижается, а даже повышается за счёт более оперативного управления несоответствиями.

Стандарт ISO 9001:2015 (в России действует как ГОСТ Р ИСО 9001-2015) в явном виде не требует учёта затрат на качество, но косвенно стимулирует его. В разделе 9 «Оценка результативности» указана необходимость анализировать данные о качестве и принимать решения на основе этих данных. Для обоснованного анализа нужно знать не только число несоответствий, но и связанные с ними издержки.

Кроме того, стандарт вводит понятие «контекст организации» и рискориентированное мышление. Это означает, что при планировании СМК организация должна учитывать как внешние, так и внутренние факторы, включая ограниченность ресурсов. Следовательно, руководители обязаны оптимизировать затраты на СМК, концентрируя их на наиболее значимых рисках.

Пункт 7.1 «Ресурсы» требует выделять ресурсы для поддержания и улучшения СМК, но эти ресурсы должны быть адекватными и не избыточными. Таким образом, правильно построенная СМК по ISO 9001:2015 сама по себе является инструментом управления затратами.

На основе проведённого анализа можно предложить следующий алгоритм для предприятий, желающих оптимизировать свои расходы на управление качеством.

1. Выделить затраты на управление качеством в отдельный объект учёта. Для этого можно использовать субсчета в бухгалтерском учёте или отдельные регистры управленческого учёта. Важно регулярно собирать данные хотя бы раз в квартал.

2. Провести классификацию затрат в соответствии с PAF-моделью. Это позволит увидеть, какая доля приходится на профилактику, оценку и потери. Оптимальным считается рост доли профилактики до 20–30% от общих затрат на качество.

3. Установить ключевые показатели эффективности (KPI). Например:

- отношение общих затрат на качество к выручке;
- доля предупредительных затрат;
- динамика внешних потерь (рекламации, гарантийные выплаты).

4. Регулярно проводить анализ «затраты – результативность». Для этого можно использовать простые методы: сравнение плановых и фактических показателей, бенчмаркинг с аналогичными предприятиями, оценку тенденций.

5. Внедрять улучшения на основе анализа. Если выявлен перерасход на аудиты – пересмотреть их периодичность. Если обучение не даёт эффекта – изменить его формат. Если затраты на контроль растут, а брак не снижается – перейти на выборочный контроль.

6. Использовать цифровые инструменты. Даже простая электронная таблица для учёта затрат даёт большой выигрыш по сравнению с полным отсутствием учёта. Более продвинутые решения – корпоративные системы класса ERP с модулем управления качеством.

При оптимизации затрат на управление качеством важно не перейти грань, за которой начинается снижение качества. Основные риски:

1. Чрезмерное сокращение обучения может привести к росту брака из-за низкой квалификации персонала. Решение – адресное обучение только по выявленным проблемам.

2. Отказ от документирования создаёт риск потери управляемости. Решение – переход от бумажного документооборота к электронному, а не полное упразднение.

3. Сокращение числа аудитов может скрыть системные проблемы. Решение – проводить меньше, но более глубоких и целевых аудитов.

4. Экономия на поверке средств измерения ведёт к недостоверному контролю. Решение – калибровать только критическое оборудование, а для некритического использовать упрощённые методы.

5. Таким образом, оптимизация должна быть не просто сокращением расходов, а перераспределением ресурсов в пользу наиболее эффективных мероприятий.

Управление затратами на управление качеством является важной и неотъемлемой частью эффективной работы современного предприятия. Ключевые выводы, следующие из проведённого анализа, таковы.

Во-первых, затраты на управление качеством имеют специфическую структуру и требуют отдельного учёта. Без выделения этих затрат в самостоятельную категорию невозможно принимать обоснованные решения об их оптимизации.

Во-вторых, наиболее эффективной является модель, ориентированная на предупреждение дефектов, а не на их выявление и исправление. Увеличение доли профилактических затрат, как правило, приводит к снижению общих потерь.

В-третьих, стандарт ISO 9001:2015 предоставляет методологическую основу для управления затратами через рискориентированный подход и анализ данных. Соблюдение требований стандарта не должно быть самоцелью и вести к избыточным расходам.

В-четвёртых, на практике доказана возможность снижения затрат на управление качеством на 10–20% без потери результативности за счёт автоматизации, бережливого производства и адресного обучения.

Рекомендуется предприятиям внедрить хотя бы простейший учёт затрат на управление качеством и регулярно анализировать эти данные. Это позволит превратить управление качеством из дорогого «хобби» в реальный инструмент повышения конкурентоспособности и финансовой устойчивости.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. https://docs.cntd.ru/document/1200124394
2. Портал «Качество.EUP». Статья «Stage Japan: опыт управления затратами на качество». https://quality.eup.ru/MATERIALY7/stagejapan.htm
3. Lean Quality Systems. Материалы по оптимизации затрат на качество. https://leanqualitysystems.com
4. Кросби Ф. Качество – бесплатно: искусство обеспечения качества. – М.: Экономика, 1979.
5. Деминг У.Э. Выход из кризиса: новая парадигма управления людьми, системами и процессами. – М.: Альпина Паблишер, 2017.
6. Панов В.Г. Бюджетирование и управление затратами. – М.: Финансы и статистика, 2017.
7. Томова И.Н. Современные аспекты управления качеством. // Сервис Plus, 2019, №4.
8. Чечевица И.Г. Lean-подходы в управлении качеством. // Экономика и управление, 2021.
9. Литвинова И.В. Повышение эффективности СМК. // Инженерный журнал, 2020,

Сюмайкина В.М.
аспирант
АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз-Антей»
Россия, Москва
Syumaykina.v.m@yandex.ru

ЦИФРОВОЙ ИНСТРУМЕНТ ОФОРМЛЕНИЯ И УЧЕТА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДЪЯВИТЕЛЬСКИХ И ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы цифровой трансформации системы менеджмента качества применительно к процессам проведения предъявительских и приемо-сдаточных испытаний продукции. Исследование направлено на решение недостатков традиционного (бумажного) документооборота, среди которых дублирование информации, сложность сбора данных для анализа и большие временные затраты сотрудников. В качестве решения представлен цифровой инструмент – модуль оформления и учета результатов испытаний, разработанный на базе «1С: Предприятие 8.3». Статья содержит описание функционала модуля, который включает в себя оформление и регистрацию извещений и заключений об испытаниях, формирование журналов. Одним из наиболее значимых результатов применения модуля являются: сокращение времени на оформление, оперативный доступ к данным для всех пользователей, гибкая настройка отчетности для принятия управленческих решений, сокращение количества бумажных носителей. В заключении обозначены перспективы дальнейшего развития модуля, включающие интеграцию с электронной цифровой подписью для полного перехода на безбумажный документооборот.

Ключевые слова: цифровизация системы менеджмента качества, информационная система, документооборот, контроль качества, испытания продукции

Syumaykina V.M.
Postgraduate Student
ANO DPO "NOC "Almaz-Antey"
Russia, Moscow
Syumaykina.v.m@yandex.ru

A DIGITAL TOOL FOR RECORDKEEPING AND THE OUTCOME OF THE RESULTS OF PREDELIVERY AND APPROVAL TESTS OF PRODUCTS

Abstact. The article studies the digital transformation of quality management systems as applied to product testing processes. The paper seeks to address the issues of drawbacks of traditional (paper-based) document flow during testing, including data duplication, difficulties in data collection for analysis, and high time costs for employees. As a solution, a digital tool is presented – a module for documenting and recording test results, developed on the basis of the «1C:Enterprise 8.3». The article describes the functionality of the module, which includes the preparation and registration of test notifications and reports, as well as the generation of logs. One of the most significant findings to emerge from this study is reduced documentation time, prompt data access for all users, flexible reporting for managerial decision-making, and a reduction in the use of paper documents. The conclusion outlines prospects for further development of the tool, including integration with electronic digital signatures for a complete transition to paperless document flow.

Keywords: digitalization of quality management system, information system, document flow, quality control, product testing

Система менеджмента качества организации включает в себя действия, с помощью которых организация устанавливает свои цели и определяет процессы и ресурсы, требуемые для достижения желаемых результатов. Система менеджмента качества функционируют на основе семи принципов, один из которых звучит следующим образом: «принятие решений, основанное на свидетельствах» [1]. В связи с тем, что основной задачей системы менеджмента качества является обеспечение выпуска продукции, соответствующей установленным требованиям, то анализ свидетельств о качестве изготавливаемой продукции и своевременное принятие управленческих решений в области управления качеством – одна из основных задач руководства и путь к достижению устойчивого успеха организацией.

Анализ данных и принятие управленческих решений в области управления качеством требует применения цифровых технологий, в том числе создания и развития информационных систем (ИС).

В области управления качеством современными авторами разрабатываются методы цифровизации СМК [2, 3], методы формирования информационных систем [4], отдельные цифровые инструменты [5, 6]. Цифровая трансформация СМК является многоступенчатым процессом, состоящим из создания и интеграции отдельных цифровых решений в информационную среду организации. Интеграция отдельных цифровых технологий создает предпосылки для цифровой трансформации всего жизненного цикла изделия.

Цифровые технологии (ЦТ) в управлении качеством применяют для повышения эффективности управления качеством, создания достоверного массива данных и обеспечения принятия управленческих решений.

В условиях санкционного давления для укрепления национальной и информационной безопасности руководством РФ были обозначены стратегические направления по обеспечению научно-технологического развития, достижения цифровой зрелости в ключевых отраслях экономики (включая электронную промышленность) [7, 8].

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что одним из важнейших направлений развития ИС управления качеством является совершенствование системы учета данных о качестве продукции.

Система контроля качества продукции является частью системы менеджмента качества и включает в себя комплекс работ, включающих в себя проведение предъявительских и приемо-сдаточных испытаний.

В соответствии с ГОСТ 16504-81 предъявительские испытания (ПИ) – контрольные испытания продукции, проводимые службой контроля качества предприятия-изготовителя перед предъявлением её для приемки представителем заказчика, потребителя и других органов приемки [9].

Приемо-сдаточные испытания (ПСИ) – контрольные испытания продукции, по результатам которого принимается решение о её пригодности к поставке и использованию.

ПИ и ПСИ включают в себя комплекс взаимосвязанных документов:

Извещения на ПИ и ПСИ являются документом, который информирует контрольное подразделение о готовности продукции к проведению испытаний. Извещения на ПИ и ПСИ содержат в себе сведения о предъявляемой продукции.

Заключения о результатах ПИ и ПСИ являются документом, который содержит сведения о результатах ПИ и ПСИ, вывод о годности (забраковании) продукции.

Журналы регистрации извещений и результатов ПИ и ПСИ являются документами, которые обеспечивают идентификацию и прослеживаемость порядка проведения ПИ и ПСИ.

Анализ документов ПИ и ПСИ показал, что информация в каждом документе частично дублируется, например, наименование и обозначение изделия, договор поставки, количество, сведения о результатах предыдущего контроля качества.

Документы ПИ и ПСИ являются свидетельствами о качестве готовой продукции, они подлежат сохранению в течение гарантийного срока продукции и должны подвергаться анализу. Анализ результатов ПИ и ПСИ показывает эффективность производственного контроля качества и контроля качества со стороны ОТК.

Для принятия управленческих решений в области контроля качества требуется проведение анализа результатов ПИ и ПСИ по разным критериям, например, по изделию, по отделу, по периоду, по исполнителю, осуществляющему контроль качества, и другие.

Проведение анализа результатов ПИ и ПСИ осложняется применением традиционной, бумажной формы в связи с длительностью и сложностью сбора данных по различным критериям.

Для решения перечисленных проблем было принято решение о разработке цифрового инструмента – модуля оформления и учета результатов ПИ и ПСИ продукции на основе 1С: Предприятие 8.3 (модуль).

Модуль состоит из двух подразделов:

1 подраздел – оформление и учет результатов ПИ;

2 подраздел – оформление и учет результатов ПСИ.

Функционал модуля включает в себя оформление проектов (печатных форм) предъявительских документов, заключений о результатах испытаний, формирование журналов ПИ и ПСИ, возможность прикрепления скан-копий, импорт сводных данных в табличный файл. При формировании документов учтены особенности различных типов продукции.

Визуально модуль представлен набором кнопок, представленных на рисунке 1.

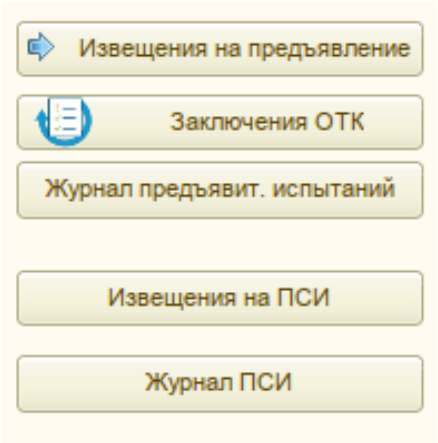


Рис. 1. Общий вид модуля оформления и учета результатов ПИ и ПСИ

Извещение на предъявление заполняет работник отдела-изготовителя, используя справочники номенклатуры, договоров и контрагентов. Внешний вид окна извещения на предъявление представлен на рисунке 2.

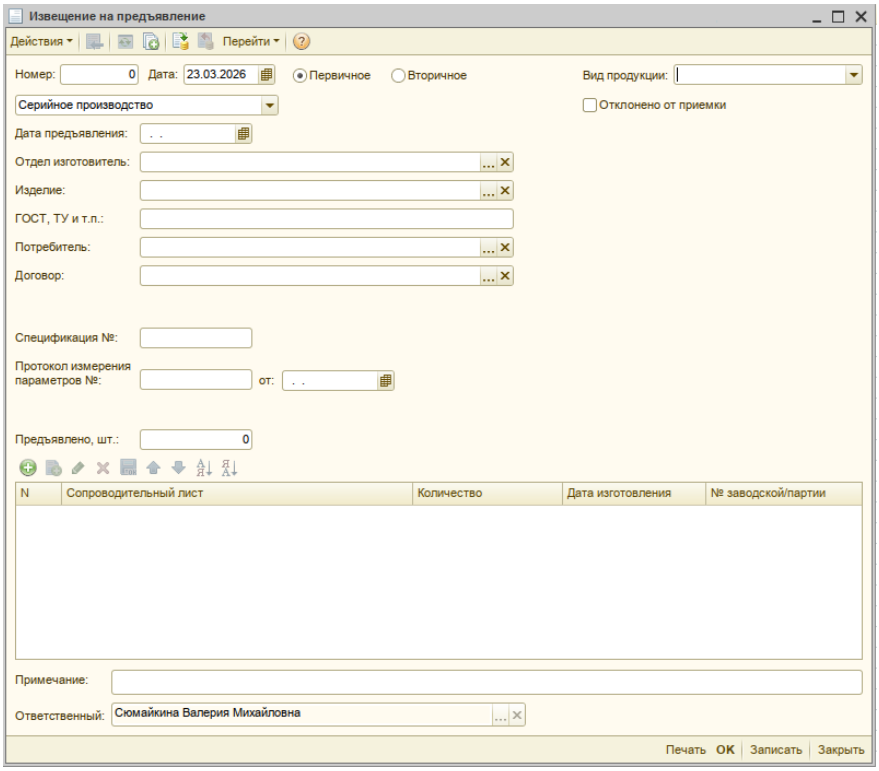


Рис. 2. Окно оформления извещения на предъявление

Заключение ОТК оформляет работник ОТК, проводивший предъявительские испытания. Заключение можно создать только на основании извещения. Внешний вид окна заключения ОТК представлено на рисунке 3.

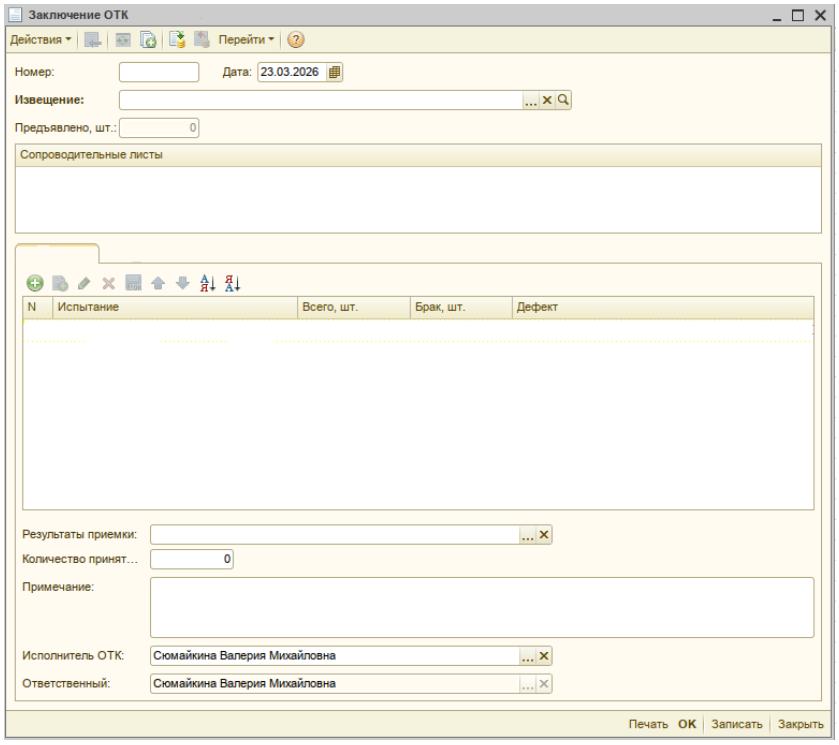


Рис. 3. Окно оформления результатов испытаний

Журнал предъявительских испытаний является формой представления данных, введенных в окнах извещения на предъявление и заключение ОТК. В журнале предусмотрены фильтры (период, направление производства, изделие, отдел-изготовитель).

Аналогичным образом сформирован подраздел учета ПСИ. Отличием является то, что сведения о результатах ПСИ заполняют работники ОТК, подтверждая корректность внесенных данных прикреплением скан-копии извещения и заключения ПСИ.

Для обретения работниками организации навыков работы с модулем, а также снижения сопротивления изменениям были разработаны памятки по использованию модуля, проведены разъяснительные беседы и занятия.

. Разработанный модуль оформления и учета результатов ПИ и ПСИ является цифровым инструментом системы менеджмента качества и позволяет собирать и анализировать данные о результатах контроля качества продукции.

Применение модуля позволяет:

- экономить рабочее время работников предприятия на заполнение бумажных документов (примерно 15 минут с каждого предъявления продукции);

- экономить рабочее время работников на предоставление сводных сведений о результатах ПИ и ПСИ, т.к. любой работник имеет доступ к данным и может самостоятельно формировать необходимые исходные данные;

- повысить оперативность получения данных о результатах контроля качества изделий (журналы ПИ и ПСИ доступны для просмотра на любом рабочем месте, где установлен 1С: Предприятие 8.3);

- отказаться от оформления второго экземпляра извещения и заключения ПСИ и его дальнейшего хранения путем прикрепления скан-копии в модуль;

- оптимизировать количество применяемых форм документов и обеспечить исключение ошибок при заполнении форм документов;

- обеспечить гибкое формирование данных контроля качества изделий для анализа данных;

- обеспечить осуществление анализа данных о качестве изделий без дополнительного запроса данных в отдел технического контроля.

Дальнейшее развитие модуля может быть осуществлено путем применения цифровых подписей и полного исключения выпуска бумажных экземпляров предъявительских документов в организации.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М. : Стандартинформ, 2015. – 52 с.
2. Ковригин Е.А. Интеграция современных цифровых технологий в систему менеджмента качества высокотехнологичных предприятий : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2020,
3. Савич Е.К. Методика цифровизации системы менеджмента качества // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 9. – С. 9–15.
4. Афанасьев В.Б. Особенности проектирования системы информационной поддержки качества продукции оборонного предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020, – № 5. – С. 255–269.
5. Интеллектуальные инструменты управления качеством цифрового производства / Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Нилов М.Ю. [и др.]. Стандарты и качество. – 2020, – № 3. – С. 68–72.
6. Савич Е.К., Антипов Д.В., Дмитриев Д.М. Цифровой паспорт качества. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025612035 ; заявл. 23.12.2024 ; опубл. 24.01.2025.
7. Россия. Правительство. Распоряжение от 17.01.2020 № 20-р (ред. от 21.10,2024) «Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года». – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Россия. Президент. Указ от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». – Российская газета. – 2024. – 8 мая.
9. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2011. – 28 с.

Алиева А.А.
студент
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского
Россия, Саратов
alieva.nastya2006@gmail.com
Винокурова С.А.
доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского
Россия, Саратов
savinokurova.kmtqm@yandex.ru
Соловьёва В.А.
к.п.н., доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского
Россия, Саратов
v.a.solovyova@gmail.com

ДОМАШНЯЯ МЕТРОЛОГИЯ: РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛАССА ТОЧНОСТИ БЫТОВЫХ ВЕСОВ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕМ БЕЗ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

Аннотация. В статье рассматривается проблема метрологической осведомлённости пользователей бытовых весов, не подлежащих обязательной поверке согласно Федеральному закону № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» и Постановлению Правительства РФ № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений». Показано, что процедура оценки класса точности доступными средствами требует от пользователя знаний в области метрологии, статистики и программирования, что создаёт существенный барьер для неподготовленного человека. В работе предлагается решение в виде программного приложения на языке Python с графическим интерфейсом, позволяющего пользователю ввести минимальный набор экспериментальных данных (диапазон измерений прибора, эталонное значение и результаты многократных взвешиваний) и автоматически выявить промахи по критерию Граббса, рассчитать пределы допускаемой приведённой основной погрешности для приборов с чисто аддитивной моделью погрешности, либо пределы допускаемой относительной основной погрешности для чисто мультипликативной модели, определить класс точности в соответствии с ГОСТ 8.401-80, Представлены теоретическое обоснование выбора моделей погрешности, алгоритмы статистической обработки и пример практического использования. Разработанное средство позволяет пользователю без специальной подготовки принимать обоснованное решение о пригодности прибора к использованию либо необходимости его замены.

Ключевые слова: бытовые весы, поверка средств измерений, класс точности, приведённая погрешность, относительная погрешность, аддитивная модель, мультипликативная модель, критерий Граббса, Python.

Alieva A.A.
Student
Saratov State University
Russia, Saratov

alieva.nastya2006@gmail.com
Vinokurova S.A.
Associate Professor of the Department of Materials Science, Technology and Quality Management
Saratov State University
Russia, Saratov
savinokurova.kmtqm@yandex.ru
Solovyova V.A.
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science, Technology and Quality Management
Saratov State University
Russia, Saratov
v.a.solovyova@gmail.com

HOME METROLOGY: DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR ASSESSING THE ACCURACY CLASS OF HOUSEHOLD SCALES BY THE USER WITHOUT SPECIAL TRAINING

Abstact. The article discusses the problem of metrological awareness of household scales users that are not subject to mandatory verification in accordance with Federal Law No. 102-FZ «On Ensuring the Uniformity of Measurements» and Decree of the Government of the Russia No. 1847 «On Approval of the list of measurements related to the sphere of state regulation of ensuring the uniformity of measurements.» It is shown that the procedure for assessing the accuracy class by available means requires the user to have knowledge in the field of metrology, statistics and programming, which creates a significant barrier for an untrained person. The paper proposes a solution in the form of a Python software application with a graphical interface. The application allows the user to enter a minimum set of experimental data (measuring range of the device, reference value and results of multiple weighings) and to detect errors according to the Grubbs criterion automatically, to calculate the limits of the permissible reduced basic error for devices with a purely additive error model, or the limits of the permissible relative the main error for a purely multiplicative model, to determine the accuracy class in accordance with GOST 8.401-80, The theoretical justification of the choice of error models, statistical processing algorithms and an example of practical use are presented. The developed tool allows the user to make an informed decision about the suitability of the device for use or the need to replace it without special training.

Keywords: household scales, verification of measuring instruments, accuracy class, reduced error, relative error, additive model, multiplicative model, Grubbs criterion, Python.

Проблема достоверности результатов измерений в бытовых условиях имеет большое практическое значение. В частности, взвешивание ингредиентов при приготовлении пищи, дозирование косметических средств (краски для окрашивания волос, тонеры, маски), определение массы биологически активных добавок и лекарственных препаратов – во всех этих случаях погрешность измерений может иметь непосредственные последствия: от неудовлетворительного эстетического результата до угрозы здоровью при неверном дозировании.

При этом бытовые весы, согласно действующему законодательству Российской Федерации, не подлежат обязательной поверке. Обязательная

поверка требуется только для средств измерений (далее – СИ), используемых в строго определённых сферах деятельности. Это прямо следует из положений Федерального закона от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», согласно которому обязательной поверке подлежат средства измерений, применяемые в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Бытовая сфера в этот перечень не входит.

Таким образом, пользователь оказывается в парадоксальной ситуации: с одной стороны, качество конечного результата напрямую зависит от точности прибора; с другой – законодательство не обязывает производителя или продавца предоставлять подтверждение метрологической исправности бытовых весов, а сам пользователь, как правило, не обладает ни специальными знаниями в области метрологии, ни доступом к поверочному оборудованию. Калибровка прибора в домашних условиях также сопряжена со значительными трудностями: необходимость понимания алгоритмов калибровки конкретной модели и, что не менее важно, риск необратимого нарушения заводских настроек.

Изложенное противоречие определяет проблему настоящего исследования: отсутствие доступного неподготовленному пользователю инструмента для самостоятельной оценки метрологических характеристик бытового прибора, не требующего специального оборудования, глубоких метрологических знаний или навыков программирования.

Цель работы – разработка программного средства на языке Python, позволяющего пользователю без специальной метрологической подготовки в интерактивном режиме получить автоматический расчёт класса точности прибора в соответствии с требованиями ГОСТ 8.401-80 и принять обоснованное решение о пригодности прибора к дальнейшей эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ нормативно-правовой базы, определяющей статус бытовых весов в системе обеспечения единства измерений, систематизировать полученные сведения.
2. Осуществить и обосновать выбор моделей погрешности, показателей, необходимых для включения в расчёты программы.
3. Разработать алгоритм статистической обработки экспериментальных данных.
4. Реализовать программное средство с графическим интерфейсом пользователя на языке Python.
5. Апробировать разработанное средство на контрольном примере и интерпретировать полученные результаты.

Научная новизна работы заключается в интеграции существующих норм и методов в форму, доступную для использования неподготовленным пользователем, с одновременным сохранением метрологической коррект-

ности вычислений. Разработанное средство заполняет нишу между полноценным метрологическим поверочным оборудованием и полным отсутствием какой-либо оценки точности у бытового пользователя.

Отношения в области обеспечения единства измерений в Российской Федерации регулируются Федеральным законом от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ (с изменениями на 8 августа 2024 года) «Об обеспечении единства измерений» (далее – Закон № 102-ФЗ). Ключевым понятием в контексте настоящего исследования является «сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений» – именно для средств измерений, применяемых в этой сфере, установлены обязательные метрологические требования, включая обязательность и правила поверки, устанавливаемые, в частности, статьёй 13 Закона № 102-ФЗ. В части 3 статьи 1 Закона № 102-ФЗ даётся перечень сфер деятельности, при осуществлении которых, а также при наличии обязательных метрологических требований в целях, предусмотренных частью 1 статьи 1 рассматриваемого Федерального закона, выполняемые измерения подлежат государственному регулированию [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

В свою очередь перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, устанавливается Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 года № 1847 (с изменениями на 24 сентября 2024 года) (далее – ПП РФ № 1847). Согласно документу, СИ массы относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений при использовании в ветеринарной деятельности для взвешивания животного, в области охраны окружающей среды для взвешивания вещества, а также при осуществлении торговли, выполнении работ по расфасовке, учёте количества энергетических ресурсов, оказании услуг почтовой связи, осуществлении деятельности в области гидрометеорологии, проведении налоговых, таможенных операций и таможенного контроля, проведении официальных спортивных соревнований, обеспечении подготовки спортсменов высокого класса, обеспечении безопасности дорожного движения, производстве, использовании и обращении драгоценных металлов и добыче, использовании и обращении драгоценных камней [1].

Бытовые весы, используемые исключительно для личных, домашних нужд, не входят в указанную сферу государственного регулирования, а значит требования к проведению первичной поверки (при выпуске в обращение) и последующей периодической поверки на них не распространяются. Это означает, что, приобретая бытовые весы, пользователь не имеет законных оснований требовать от продавца или производителя предоставления действующего документа о поверке, при этом наличие у прибора завышенной погрешности (как изначальной, так и возникшей в процессе эксплуатации) не влечёт для продавца юридической ответственности.

Таким образом, ответственность за оценку и контроль точности бытовых весов полностью ложится на самого пользователя. Именно в этой точке

возникает практическая потребность в инструменте, который позволил бы пользователю самостоятельно, без специального оборудования и глубоких знаний, оценить, насколько его прибор соответствует заявленным характеристикам (если они вообще заявлены) или насколько он пригоден для решения конкретной бытовой задачи.

Прежде чем переходить к описанию алгоритмов и программной реализации, необходимо чётко определить систему понятий, используемую в работе. Это позволит однозначно интерпретировать как нормативные требования, так и результаты, получаемые с помощью разработанного приложения.

Согласно ГОСТ Р 8.736-2011, погрешность измерения – разность между результатом измерения величины и действительным (опорным) значением величины [3].

ГОСТ 8.401-80 устанавливает, что пределы допускаемых погрешностей следует выражать в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения СИ конкретного вида [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. При этом погрешность складывается из основной (составляющая погрешности СИ в нормальных условиях) и дополнительной (составляющая, возникающая дополнительно к основной и характеризующая отклонение какой-либо из влияющих величин от нормального значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений) составляющих. В приближённо простом случае предполагается преобладание основной погрешности, которая и будет рассматриваться далее, без учёта дополнительной составляющей.

Абсолютная погрешность – непосредственно значение погрешности как отклонения показания прибора от действительного (опорного) значения, выраженное в единицах измеряемой величины. Она удобна для оценки конкретного измерения, но не позволяет учитывать диапазон измерений. При этом пределами допускаемой абсолютной основной погрешности являются границы погрешности – доверительные границы при вероятности нахождения значений погрешности измерений внутри задаваемого ими интервала, равной 1 согласно РМГ 29-2013 [4].

Приведённая погрешность – это отношение абсолютной погрешности к некоторому нормирующему значению, выраженное в процентах. Нормирующее значение устанавливается в соответствии с пп. 2.3.3-2.3.7 ГОСТ 8.401-80, Так, нормирующее значение для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, следует устанавливать равным большему из пределов измерений. Этот случай может соответствовать СИ массы, для которых свойственна равномерная или практически равномерная шкала, как правило не предусматриваются номинальные значения, а также нулевое значение не условно.

При этом пределы допускаемой приведенной основной погрешности выражаются в виде интервала, задаваемого границами, найденными как отношение границ абсолютной основной погрешности измерений к нормирующему значению, выраженное в процентах. Класс точности, выраженный в форме приведённой погрешности как в документации, так и на средстве измерений, обозначается числовым значением – модулем границ, без дополнительных знаков. Именно эта форма используется для нормирования погрешности СИ, для которых границы абсолютной погрешности практически неизменны в каждой точке шкалы во всем диапазоне измерений – чисто аддитивная модель.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному (опорному) значению измеряемой величины, выраженное в процентах. Пределы допускаемой относительной основной погрешности выражаются в виде интервала, границы которого определяются как отношение границ абсолютной основной погрешности к действительному (опорному) значению измеряемой величины, выраженное в процентах. Класс точности в форме относительной погрешности, определяемый как модуль границ, в документации обозначается без дополнительных знаков, а на средстве измерений заносится в круг. Относительная погрешность служит основной нормируемой характеристикой для мультипликативных систем, где границы абсолютных погрешностей нельзя полагать постоянными и такое выражение погрешности позволяет получить постоянное значение для диапазона.

В реальных средствах измерений, как правило, присутствуют обе составляющие – и аддитивная, и мультипликативная. Однако для большинства бытовых весов (особенно недорогих электронных) вклад одной из составляющих часто является преобладающим. Кроме того, в условиях, когда пользователь не имеет доступа к метрологической службе и не обладает специальными знаниями, определение двух параметров потребовало бы проведения серии измерений с несколькими эталонными массами, что затруднительно для неподготовленного человека.

Именно поэтому в настоящей работе рассматриваются предельные случаями – чисто аддитивные и чисто мультипликативные модели. Такой выбор оправдан следующими соображениями:

1. Доступность понимания – пользователь может визуально оценить по двум-трём измерениям с разными массами, остаётся ли абсолютная погрешность примерно одинаковой (аддитивная модель) или она растёт с увеличением массы (мультипликативная модель). Эти предварительные тесты не требуют внесения результатов в программу и служат лишь для выбора подходящей модели. В отличие от двухкомпонентной модели, здесь не нужно систематизировать и заносить в приложение данные с несколькими эталонами, что упрощает процедуру;

2. Минимизация экспериментальных данных – для оценки класса точности по аддитивной модели достаточно одного эталонного значения и нескольких повторных измерений, как и для мультипликативной;

3. Гибкость выбора расчётной модели – более осведомлённый пользователь имеет возможность самостоятельно выбирать между формами выражения пределов допускаемых основных погрешностей в зависимости от решаемой им измерительной задачи.

Таким образом, применение аддитивной и мультипликативной моделей в качестве первого приближения является методически корректным и практически достаточным для большинства бытовых задач.

На основе проведённого анализа можно выделить показатели, которые необходимо включить в программу для самостоятельной оценки пользователем состояния устройства – пределы допускаемой абсолютной, приведенной (для аддитивной системы) и относительной (для мультипликативной) основных погрешностей, класс точности, вычисленный на их основе, информация о промахах – грубых погрешностях, способных существенно искажать результаты, с возможностью их исключения.

Для выбранных моделей в соответствии с ГОСТ 8.401-80 разработаны адаптированные под задачи настоящего исследования алгоритмы расчёта пределов допускаемых основных погрешностей и определения класса точности на основе многократных (от четырёх) измерений одного действительного (опорного) значения величины. В основу методики положены также требования ГОСТ Р 8.736-2011 (измерения прямые многократные) с ориентацией на серии из 4–15 измерений. Верхняя граница обусловлена тем, что на практике обычный пользователь, как правило, не будет проводить более 15 повторных взвешиваний, а кроме того, для размеров выборок в рамках установленных границ указанный стандарт не требует проверки гипотезы о нормальности распределения. При этом все предварительные вычисления в рамках методики выполняются с максимально доступной точностью, а окончательные значения пределов основных погрешностей и класса точности округляются по метрологическим правилам: если первая значащая цифра округляемого числа равна 1 или 2, сохраняются две значащие цифры, если первая значащая цифра 3 и более – одна значащая цифра [6]. При этом погрешность округления при вычислении пределов должна быть не более 5%.

Для серии из n независимых измерений одной и той же действительной (опорной) массы $X_д$ модуль абсолютной погрешности Δ_i каждого значения измеренной величины X_i (i = 1, 2, …, n) вычисляется по формуле (1).

$$\Delta_i = | X_i – X_д |. \quad (1)$$

После исключения промахов (в соответствии с пунктом 2.2 настоящей работы) из оставшихся значений Δ_i выбирается максимальное Δ_{max}, которое

при записи, согласно формуле (2), представляет собой границы погрешности – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности в рабочем диапазоне.

$$\Delta = \pm \Delta_{max}. \quad (2)$$

Для выявления грубых погрешностей (промахов) среди результатов измерений и их исключения применяется статистический критерий Граббса, рекомендованный ГОСТ Р 8.736-2011 для малых выборок и основанный на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению. Критерий применим для набора результатов, включающего не менее 4 значений. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Выбор уровня значимости (q);

Оптимальное стандартное значение уровня значимости по ГОСТ Р 8.736-2011, рекомендованное для большинства метрологических задач – q свыше 5%, что соответствует 95% доверительной вероятности, то есть риск ошибочного исключения корректного измерения равен приблизительно 0,05.

2. Вычисление выборочного среднего и выборочного стандартного отклонения;

Согласно формуле (3), производятся вычисления выборочного среднего $\bar{X}$ и выборочного среднего квадратического отклонения S для текущего количества m элементов в выборке.

$$\bar{X} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} X_j \, , S = \sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m}(X_j - \bar{X})^2} \, . \quad (3)$$

3. Вычисление критериев Граббса;

Полагая, что наибольший X_{max} или наименьший X_{min} результат измерений вызван грубыми погрешностями, вычисляются критерии Граббса G_1 и G_2 согласно формуле (4).

$$G_1 = \frac{|X_{max} - \bar{X}|}{S}, G_2 = \frac{|\bar{X} - X_{min}|}{S}. \quad (4)$$

На практике формулу (4) оптимальнее заменить на эквивалентную формулу (5), позволяющую сразу вычислить максимальное значение критерия Граббса G, показывающее максимальное абсолютное отклонение от выборочного среднего в единицах среднеквадратичного отклонения, для дальнейшей оценки [7], что возможно благодаря свойству симметрии нормального распределения.

$$G = \frac{\max|X_j - \bar{X}|}{S}. \quad (5)$$

4. Сравнительный анализ критериев Граббса.

Полученное в соответствии с формулой (5) значение G сравнивается с теоретическим значением $G_т$ критерия Граббса при выбранном уровне значимости q и количестве элементов в выборке m. Таблица, в частности, приведена в приложении А ГОСТ Р 8.736-2011. Если $G > G_T$, то X_j исключается как маловероятное значение, а при $G \leq G_T$ X_j не считается промахом и сохраняется в ряду результатов измерений.

Описанная в пунктах 1–4 процедура повторяется для оставшихся значений до тех пор, пока ни одно измерение не превысит критический порог или в выборке не останется менее трёх элементов.

Для средств измерений, у которых границы абсолютной погрешности практически неизменны в каждой точке шкалы во всем диапазоне измерений (аддитивная модель), нормируемой характеристикой является приведённая основная погрешность. Её пределы γ, выраженные в процентах, устанавливаются по формуле (6).

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \tag{6}$$

где γ – пределы допускаемой приведенной основной погрешности,%; Δ – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (2); X_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ, и выбираемое для задач работы согласно ГОСТ 8.401-80 равным большему из пределов измерений; p – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда $1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; $1{,}6 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2{,}5 \cdot 10^n$; $3 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$ (где n = 1, 0, -1, -2 ...). Вычисленное значение γ на этапе окончательного вывода округляется по метрологическим правилам, в промежуточных же расчётах оно сохраняется с высокой точностью.

Для мультипликативной модели, когда пределы допускаемой абсолютной основной погрешности пропорциональны измеряемой величине, нормируется относительная основная погрешность. Её пределы δ устанавливаются по формуле (7) и выражаются в процентах.

$$\delta = \frac{\Delta}{X_д} = \pm b, \tag{7}$$

где δ – пределы допускаемой относительной основной погрешности,%; Δ – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (2); $X_д$ – действительное (опорное) значение; b – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда $1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; $1{,}6 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2{,}5 \cdot 10^n$; $3 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$ (где n = 1, 0, -1, -2 ...). Округление результата при этом происходит аналогично предыдущим рассмотренным случаям.

Класс точности K в данной методике определяется для аддитивной модели в соответствии с формулой (8), для мультипликативной согласно формуле (9).

$$K = |\gamma_{окр}|, \tag{8}$$

где $\gamma_{окр}$ – округлённые в соответствии с метрологическими правилами пределы допускаемой приведённой основной погрешности.

$$K = |\delta_{окр}|, \quad (8)$$

где $\delta_{окр}$ – округлённые в соответствии с метрологическими правилами пределы допускаемой относительной основной погрешности.

Модуль в формулах (8) и (9) имеет смысл модуля границ, без дополнительных знаков и обозначений, что соответствует определению класса точности.

Опираясь на ранее выявленные метрологические зависимости и требования нормативных документов, а также на разработанную методику расчёта пределов допускаемых основных погрешностей и определения класса точности был разработан программный код, реализующий цель данного исследования. Ключевыми элементами кода являются следующие блоки: 1. подключение библиотек; 2. функция, реализующая метрологическое округление; 3. функция, реализующая метод Граббса выявления промахов; 4. функция определения нормирующего значения; 5. класс, реализующий графический интерфейс; 6. метод для презентабельного вывода чисел; 7. основные расчеты; 8. запуск приложения. Опишем перечисленные блоки кода более детально.

1. В разделе 1 реализуется подключение используемых библиотек, подключаются стандартные модули: math для математических операций, tkinter и его производные (ttk, messagebox, scrolledtext) для построения графического интерфейса, а также typing для явной аннотации типов (список чисел). Это обеспечивает кроссплатформенную работу без установки дополнительных пакетов.

2. Раздел 2 иллюстрирует функцию round_to_significant(value), предназначенную для осуществления округления результатов (value) по метрологическим правилам. Она включает обработку неположительных значений и защиту от вычислительных ошибок, определение порядка числа путём установления степени десятичного логарифма с дальнейшей нормализацией (приведением к интервалу от 1 до 10) для выделения первой значащей цифры, осуществление выбора количества значащих цифр после округления и восстановление с его учётом исходного масштаба величин.

3. Функция detect_outliers(values, alpha: float = 0,05), содержащаяся в разделе 3 кода, реализует итеративный критерий Граббса обнаружения промахов в выборке прямых многократных измерений для уровня значимости 0,05. На вход подаётся список результатов наблюдений (values) и уровень значимости (alpha – по умолчанию 5%). При объёме выборки менее трёх элементов возвращается пустой список – критерий неприменим, в противном случае создаются копии исходных данных и соответствующих им индексов, после чего запускается цикл, на каждом шаге которого вычисляются среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение (СКО) и максимальное абсолютное отклонение от среднего. Отношение максимального отклонения к СКО представляет собой критерий Граббса G, который сравнивается с критическим значением из встроенной таблицы для соответствующего объёма выборки (значения приведены для уровня значимости 0,05).

Если G превышает порог, то измерение, вызвавшее максимальное отклонение, признаётся промахом, его исходный индекс сохраняется, а само значение удаляется из рабочей выборки. Процесс повторяется до тех пор, пока ни одно из оставшихся наблюдений не будет идентифицировано как промах, или пока в выборке не останется менее 3 элементов. В итоге возвращается отсортированный список индексов исходных элементов, признанных промахами, что позволяет в дальнейшем исключить их из расчёта пределов допускаемых основных погрешностей и класса точности.

4. Функция choose_norm_value(x_min, x_max) из раздела 4 определяет нормирующее значение для выборки как большее из пределов измерений прибора, подающихся на вход.

5. В разделе 5 описан класс ScaleResearchApp, который реализует главное окно пользовательского интерфейса с полями ввода, радиокнопками выбора модели погрешности, чекбоксом учёта промахов и областью вывода результатов. В основе методов класса лежит библиотека tkinter, позволяющая создавать графические окна с элементами управления (поля ввода, кнопки, списки, флажки и т.д.) без установки дополнительных пакетов [8]. Особенность реализации – динамическое добавление полей для результатов измерений: пользователь задаёт количество экспериментов, нажимает «Создать поля для измерений», и программа генерирует нужное число строк ввода. Старые поля при этом автоматически удаляются при повторной генерации. Для удобства просмотра большого списка используется прокручиваемая область на основе Canvas. Вывод результатов выполняется в текстовое поле с поддержкой вертикальной прокрутки. Приложение также поддерживает всплывающее окно, информирующее пользователя об ошибках во введённых данных.

6. Функция, принадлежащая классу ScaleResearchApp и описываемая в разделе 6 кода, _format_number(self) позволяет преобразовать число в «красивую» строку для вывода пользователю, исключая пренебрежительно малые значения и форматируя числа для исключения «лишних» нулей.

7. Раздел 7 содержит функцию calculate(self) из класса ScaleResearchApp для осуществления основных вычислений и вывода результатов. Метод последовательно считывает и валидирует диапазон, эталон, результаты измерений; проверяет количество измерений (выдаёт предупреждения при $n<4$ или $n>15$, что обусловлено рекомендациями ГОСТ Р 8.736-2011); вычисляет модули абсолютных погрешностей, вызывает функцию поиска промахов; в зависимости от выбранной модели (аддитивная или мультипликативная) рассчитывает пределы допускаемых абсолютной, приведённой или относительной основных погрешностей; округляет все итоговые значения через round_to_significant и выводит их в текстовое поле, используя вспомогательный метод _format_number; класс точности устанавливается равным округлённому пределу допускаемой приведённой (аддитивная модель) или относительной (мультипликативная модель) основной погрешности; для мультипликативной модели символ кружка выводится перед числом.

8. В разделе 8 кода реализуется запуск программы, делая интерфейс доступным пользователю.

Для апробации разработанного программного средства были проведены измерения на электронных кухонных весах модели SIERRA SF-400 (максимальная нагрузка 10 кг, минимальная – 1г, что отражено в инструкции к прибору). В качестве действительного (опорного) значения использовалась спортивная гиря массой 2,000 кг. Измерения проводились в условиях, имитирующих реальную домашнюю обстановку: весы установлены на ровной столешнице при комнатной температуре, без сквозняков и вибраций.

Для выбора модели системы были первоначально произведены четыре тестовых измерения массы выбранной гири и дополнительно пачки сахара заявленной массы 1,000 кг (из-за возможной неустойчивости массы сахара (частичные потери, гигроскопичность) данный объект применялся исключительно для предварительного определения типа системы, но не для самих расчётов, однако, как было выяснено, обыватель может использовать и его, так как отклонения от эталонного значения минимальны для бытовых задач). Средняя абсолютная погрешность, которую несложно вычислить, при проведении четырёх измерений для сахара составила 4,2 г, а для гири 62,4 г. Таким образом, было выявлено, что абсолютная погрешность возросла с ростом измеряемого действительного (опорного) значения величины, что указывает на то, что система скорее мультипликативная. Однако для проверки работы и рассмотрения всех возможностей программы расчёты выполнялись для обеих моделей (мультипликативная модель, аддитивная модель).

Результаты независимых десятикратных измерений массы двухкилограммовой гири занесены в таблицу.

Таблица

Результаты десятикратных измерений массы двухкилограммовой гири на весах SIERRA SF-400

Номер измерения i	Значение измеренной величинs X_i, кг
1	2,064
2	2,063
3	2,062
4	2,061
5	2,062
6	2,061
7	2,063
8	2,063
9	2,064
10	2,061

Данные диапазона измерений весов SIERRA SF-400, эталонное значение массы гири, а также результаты всех десяти измерений были введены в соответствующие поля программы. Флажок учёта промахов при этом оставался выключенным, следовательно, выявленные грубые погрешности не учитывались при расчётах. На рисунке 1 проиллюстрировано окно пользовательского интерфейса, отображающее входные данные, а также результаты работы программы для случая выбора чисто аддитивной модели, а на рисунке 2 – для чисто мультипликативной модели погрешности.

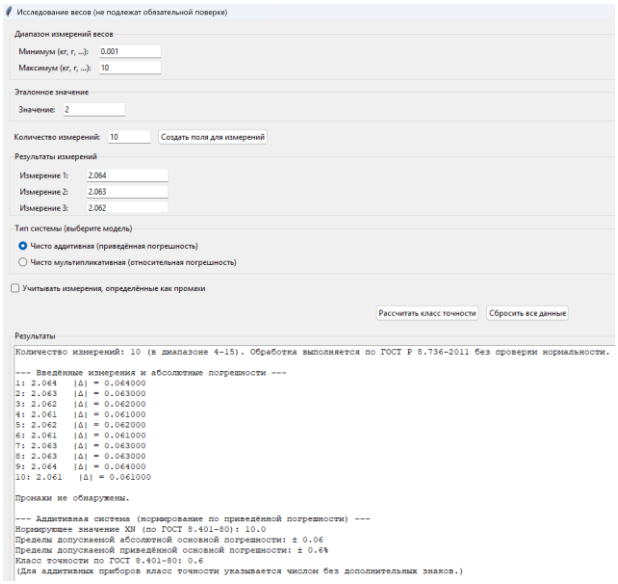


Рис. 1. Окно программы для результатов обработки десяти измерений эталонной массы при выборе «Чисто аддитивная (приведённая погрешность)» модели погрешности

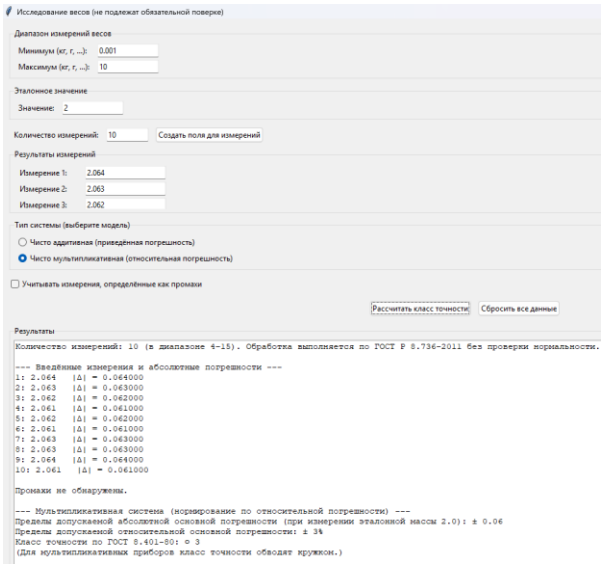


Рис. 2. Окно программы для результатов обработки десяти измерений эталонной массы при выборе «Чисто мультипликативная (относительная погрешность)» модели погрешности

Таким образом, в результате работы программа выдала пользователю развёрнутый отчёт, отражающий все этапы обработки. В первую очередь приложение проверило количество введённых измерений на предмет попадания в рекомендуемый диапазон от 4 до 15. Поскольку было зафиксировано десять значений, система уведомила пользователя, что обработка выполняется согласно ГОСТ Р 8.736-2011 без проверки гипотезы о нормальности распределения. После, для каждого измерения была с высокой точностью рассчитана абсолютная погрешность относительно эталонного значения массы, а получившийся список из результатов измерений и модулей соответствующих абсолютных погрешностей был представлен в виде таблицы. Отдельным сообщением программа констатировала отсутствие грубых погрешностей – ни одно из значений не было идентифицировано как промах по критерию Граббса.

При выборе аддитивной модели далее программой было определено нормирующее значение, равное верхнему пределу измерений – 10 кг, вычислены пределы допускаемой абсолютной основной погрешности – они составили $\pm 0{,}06$ кг при округлении по метрологическим правилам, и на основе этого рассчитаны пределы допускаемой приведённой основной погрешности, которые после метрологического округления оказались равными $\pm 0{,}6\%$. Класс точности программа установила как 0,6, сопроводив пояснением, что для аддитивных приборов такое обозначение записывается просто числом без каких-либо дополнительных знаков.

При переключении на мультипликативную модель алгоритм изменил расчётную схему. После проверки набора значений на промахи программа также, как и в случае аддитивной системы, установила пределы допускаемой абсолютной основной погрешности равными $\pm|\Delta|_{max}$ (где $|\Delta|_{max}$ – больший из модулей абсолютных погрешностей), которые после округления составили $\pm 0{,}06$ кг, а также нашла пределы допускаемой относительной основной погрешности – $\pm 3\%$. Класс точности в этой модели был установлен как 3, программа также указала, что на самом приборе или в паспорте такое обозначение обводится кружком в соответствии с ГОСТ 8.401-80,

Сравнение результатов, полученных для двух моделей, показывает, что значения пределов допускаемых приведённой и относительной основных погрешностей различаются: $\pm 0{,}6\%$ и $\pm 3\%$, а следовательно – выбор типа системы оказывает заметное влияние на определение класса точности исследуемого прибора. Тем не менее, оба показателя находятся рядом по порядку величин и являются достаточно малыми, что свидетельствует о приемлемой точности испытуемых весов. Даже если пользователь ошибочно выберет модель, не соответствующую реальному поведению прибора, итоговая оценка не приведёт к противоположным выводам о его пригодности – для большинства бытовых задач (взвешивание ингредиентов, косметических средств, лекарственных форм) такие расхождения остаются допустимыми. Таким образом, на основании апробации, можно резюмировать, что

разработанное приложение продемонстрировало полную функциональность, корректную реализацию заложенных алгоритмов и пригодность для самостоятельного использования неподготовленным пользователем.

Таким образом, разработанное в рамках данной работы программное средство предоставляет потенциальному пользователю следующие возможности:

1. ввод исходных данных через интуитивно понятный графический интерфейс;
2. автоматическое выявление грубых промахов с использованием статистического критерия Граббса;
3. возможность исключения промахов из расчёта одним флажком;
4. расчёт пределов допускаемой абсолютной основной погрешности;
5. расчёт пределов допускаемой приведённой основной погрешности и класса точности для аддитивной модели;
6. расчёт пределов допускаемой относительной основной погрешности и класса точности для мультипликативной модели;
7. полный текстовый отчёт, включающий все введённые измерения, отмеченные промахи, промежуточные вычисления и итоговый класс точности;
8. функция сброса всех данных для проведения нового эксперимента.

Для апробации программного средства были проведены тесты, подтвердившие корректность работы программы.

При этом, разработанное приложение имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации результатов:

1. Упрощённая модель погрешности – предполагается, что реальный прибор ведёт себя либо как чисто аддитивный, либо как чисто мультипликативный. На практике часто присутствуют обе составляющие, и пользователю в некоторых случаях может быть сложно сделать правильный выбор.
2. Не учитывается систематическая погрешность эталона – эталонное значение вводится пользователем как абсолютно точное. В действительности любой эталон имеет свою погрешность, которая при высоких требованиях к точности должна учитываться.
3. Ограниченный статистический аппарат – используется только критерий Граббса для выявления промахов. В будущем можно добавить критерии Диксона, Романовского и другие, а также визуализацию данных (гистограммы, диаграммы размаха).
4. Отсутствие калибровочной функции – программа не предлагает пользователю скорректировать показания весов, а только оценивает класс точности. Следующим шагом может быть добавление режима «калибровка», где по нескольким точкам строится поправочная зависимость и программа выдаёт скорректированное значение любого нового измерения.
5. Ограничение по объёму выборки – алгоритм рассчитан на серии из 4–15 измерений, поскольку для выборок до 15 ГОСТ Р 8.736-2011 не требует

проверки нормальности распределения. При обработке большего числа измерений (свыше 15) стандарт предписывает проверку нормальности, что планируется реализовать в следующих версиях программы.

Тем не менее, в рамках поставленной цели – предоставить неподготовленному пользователю простой и доступный способ оценки точности прибора – приложение полностью функционально и готово к использованию.

В рамках настоящей работы разработано и реализовано в виде программного кода на языке Python средство для самостоятельной оценки класса точности бытовых весов, предоставляющее пользователям без специальной метрологической подготовки простой инструмент для принятия обоснованного решения о пригодности прибора к использованию. К основным итогам исследования можно отнести:

1. Анализ нормативной базы (Закон № 102-ФЗ, ПП РФ № 1847) подтвердил, что бытовые весы не подлежат обязательной поверке, и ответственность за контроль их точности и, соответственно, за достоверность результатов лежит на пользователе.
2. Осуществлён и обоснован выбор двух предельных моделей погрешности – чисто аддитивной и чисто мультипликативной. Обе модели интуитивно понятны и не требуют от пользователя углублённых знаний. На их основе, руководствуясь требованиями ГОСТ 8.401-80 и ГОСТ Р 8.736-2011, удаётся корректно рассчитать пределы приведённой либо относительной погрешности и, следовательно, установить класс точности прибор.
3. Разработан алгоритм статистической обработки многократных измерений, ключевым элементом которого является критерий Граббса для выявления грубых погрешностей (промахов), который позволяет повысить достоверность итоговой оценки.
4. На языке Python создано приложение с графическим интерфейсом, работающее исключительно на стандартных библиотеках (tkinter, math, typing) и не требующее установки дополнительных пакетов. Приложение поддерживает ввод исходных данных, автоматический расчёт итогового класса точности и промежуточных показателей, а также формирование подробного отчёта, структурированного для максимально лёгкого восприятия пользователем.
5. На контрольном примере с реальными бытовыми весами и гирей показано, что программа корректно идентифицирует промахи и вычисляет класс точности, а пользователь может без глубоких знаний в области метрологии интерпретировать результат.

Таким образом, поставленная цель и сопутствующие задачи достигнуты. Предложенное решение заполняет важную нишу между полным отсутствием метрологического контроля и профессиональной поверкой, делая метрологию доступной для массового пользователя. Дальнейшее развитие может идти по пути усложнения моделей погрешности, добавления калибровочных функций и визуализации данных.

Список литературы

1. Россия. Законы. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон № 102-ФЗ: [принят Государственной Думой 11 июня 2008 года: одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года] : (ред. от 08.08.2024) – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 26. – Ст. 3021. – Текст : электронный.
2. Правительство Российской Федерации. Постановление. Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений: Постановление Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847 – Собрание законодательства Российской Федерации. – 2020, – № 48. – Ст. 7719. – Текст : электронный.
3. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple Direct measurements. Methods of measurement results processing. Main positions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1045-ст : введён впервые : дата введения 2013-01-01/разработан ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева». – Москва: Стандартинформ, 2019. – 25 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 8.401-80, Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования = State system for ensuring the uniformity of measurements. Accuracy classes of measuring instruments. General requirements : межгосударственный стандарт : издание официальное : утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 12 ноября 1980 г. N 5320 : дата введения 1981-07-01/разработан Госстандартом СССР. – Москва: Стандартинформ, 2010, – 11 с. – Текст : непосредственный.
5. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions : рекомендации по межгосударственной стандартизации : издание официальное : утверждён и введён в действие в Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 декабря 2013 г. N 2166-ст : дата введения 2015-01-01/разработан ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева». – Москва: Стандартинформ, 2014. – 60 с. – Текст : непосредственный.
6. Соловьева В. А. Методологические принципы подготовки и проведения статистических обследований / В. А. Соловьева, С. А. Винокурова // Статистическое образование в России: интеллектуальный анализ данных. Материалы международной конференции (конгресса). – Оренбург, 2023. – С. 424-433.
7. Дорофеев В. С. Ансамблирование методов обнаружения выбросов при подготовке обучающей выборки данных / В. С. Дорофеев, Т. М. Волосатова. Текст: электронный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии: [научный журнал]. – 2022. URL: (дата обращения: 02.04.2026).
8. Python Software Foundation. Python Documentation: tkinter – Tk interface : [электронный ресурс]. – URL: https://docs.python.org/3/library/tkinter.html (дата обращения: 02.04.2026) – Текст : электронный.

Искиердо Паредес Райдель
директор по развитию и инвестициям,
Предприятие по восстановлению сырья
Куба, Пинар-дель-Рио
raidelrip50@gmail.com
Адылина А.П.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»,
Московский политехнический университет,
Россия, Москва
dmitr1eva@mail.ru

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В СФЕРЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

Аннотация. Представлен анализ интеграции цифровых экономических механизмов стимулирования в системы переработки твёрдых коммунальных отходов (ТКО) Российской Федерации. Критически низкий показатель переработки (3,6–10%) обусловлен не технологическими дефицитами, а отсутствием прямых стимулирующих механизмов, направленных на производителей отходов. Исследование демонстрирует, что экологическое сознание само по себе недостаточно для достижения конкурентоспособных объёмов сбора; необходимы материальные (денежные) и иные осязаемые стимулы. Предлагаемое решение – «модель» – объединяет минимальную инфраструктуру сбора, сортировку в источнике, мгновенные электронные платежи и полную трассируемость отходов. Ожидаемые результаты включают повышение объёмов сбора, создание новых рабочих мест, получение вторичного сырья и снижение захоронения отходов на полигонах.

Ключевые слова: цифровых экономических, переработка отходов, прямых стимулирующих система, системы переработки, ТКО.

Izquierdo Paredes Raidel
Director of Development and Investments,
Raw Materials Recovery Company
Cuba, Pinar del Río
raidelrip50@gmail.com
Adylina A.P.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
dmitr1eva@mail.ru

INNOVATIVE SOLUTIONS IN WASTE RECYCLING

Abstract. This document investigates the integration of economic incentive using digital mechanisms within solid waste management and recycling infrastructure systems across the Russia. The persistently low national recycling performance rate–currently ranging between 3.6% and 10%–appears to stem primarily from gaps in direct incentivization frameworks directed to waste generators, rather than from underlying technological limitations. Research demonstrates that environmental consciousness alone proves inadequate as a behavioral driver for achieving industry-competitive collection volumes; consequently, tangible financial incentives and complementary reward systems remain indispensable. The proposed solution for centers on the “Model», a comprehensive framework integrating baseline collection

infrastructure, source-level waste segregation, real-time electronic payment mechanisms, and end-to-end waste traceability systems. Anticipated deliverables encompass: enhanced collection capacity and efficiency, creation of many employment opportunities, recovery and valorization of secondary materials, and substantial reduction in landfill dependency.

Keywords: digital economy, waste recycling, direct incentive system, recycling systems, MSW.

Ряд авторов [1,2], определяют стимулированную переработку как систему материальных и нематериальных вознаграждений, трансформирующих гражданское поведение и мировоззрение в отношении переработки – от чисто морального и экологического аспекта к экономическому видению, в котором переработка становится источником осязаемых выгод. Авторы утверждают, что «эффективность стимулирующих структур критически зависит от того, воспринимаются ли стимулы как усиление внутренней мотивации (автономная мотивация) или как внешний контроль, подрывающий внутреннюю мотивацию (управляемая мотивация), причём первый подход обеспечивает более устойчивое поведенческое изменение» [3].

Экологическое сознание как таковое не генерирует высокие объёмы сбора твёрдых коммунальных отходов и тем более надлежащую их классификацию из-за потребительского поведения людей и их необходимости видеть материальную выгоду. Соответственно, переработка без применения стимулов не достигнет желаемых показателей в Российской Федерации. Справедливо утверждение: *«только стимулированная и рентабельная переработка может быть устойчивой»*.

В России одной из ключевых задач является повышение осведомлённости населения об устойчивом потреблении посредством просветительских кампаний о выгодах переработки, адресованных населению. Показатели спонтанной переработки немногим превышают 5% вне крупных городов [4]. В связи с этим рекомендовано внедрение масштабных кампаний и создание экономических стимулов на всех уровнях – от отдельных граждан до корпоративного и государственного секторов [5].

Таблица

Участие граждан в переработке под влиянием стимулирующих кампаний

Год	Государственные кампании (единиц)	Прямые экономические стимулы (единиц)	Активно перерабатывающие граждане (%)
2022	32	8	14
2023	41	12	16
2024	50	14	18

Применение цифровых приложений в области переработки с поддержкой экономических стимулов успешно реализуется во многих странах. Среди наиболее примечательных – испанское приложение RECICLA.APP

[6], доступное в открытом доступе на всей территории Испании. Пользователи получают прямое вознаграждение за валидированную переработку. Хотя сумма может показаться скромной, принципиально важно то, что это реальные деньги, переводимые незамедлительно. Это средства, которые можно потратить при следующей покупке в любом магазине.

В Швеции функционирует наиболее успешная в мире система залога-возврата. Управляемая компаниями **Pantamera**[7] и **Returpack**, она позволяет гражданам сдавать пластиковые бутылки (ПЭТ) и алюминиевые банки в автоматизированные установки, стратегически размещённые в супермаркетах и общественных местах. Механизм функционирования: автомат выдаёт ваучер или квитанцию со стоимостью возвращённых залогов, обменяваемые на наличные в кассе учреждения или используемые как скидка при покупке или приложение Pantamera (цифровой вариант) сканирует персональный QR-код с экрана машины возврата.

Все последующие возвращённые контейнеры цифровым образом связываются как счётные единицы в приложении. Пользователь может пожертвовать средства выбранной благотворительной организации или перевести деньги на свой личный банковский счёт в Швеции.

В 2024 году Швеция обработала приблизительно 2,87 млрд контейнеров. Учитывая средний вес контейнера напитков (~150 граммов), это составляет порядка 430 500 тонн переработанных отходов в год.

На Кубе для стимулирования переработки отходов как на уровне граждан, так и в промышленности действует Закон № 1288 от 1975 года (распространяется на корпоративный и малый бизнес), проверяемый органами надзора компаний переработки. Страна использует несколько каналов предоставления денежных стимулов, опираясь на платёжные платформы, в том числе на Virtual BANDEC для государственных и частных предприятий, приложение компании телекоммуникаций Cubas ETECSA под названием TRANSFERMOVIL, которое позволяет выплачивать денежные стимулы за объём сданных отходов на переработку, а также посредством предоплаченных карт, привязанных к пункту переработки, где средства незамедлительно переводятся на банковский счёт поставщика в эквиваленте стоимости отходов в зависимости от их массы в килограммах.

Система выдачи **«эко-кредитов»** потребителям в Японии, которые переработают и повторно используют продукты в конце их жизненного цикла. Эти кредиты могут использоваться для скидок при покупке, обмена на билеты в музеи и театры, либо пожертвования на программы лесоустройства [1].

В Норвегии представили систему цифрового управления твёрдыми отходами. Система цифрового учёта ресурсов интегрирует данные пользователей и автоматизирует отчётность, облегчая стимулирование и способствуя циркулярности [8]. Масштабы реализации значительны: система использует цифровой учёт для поощрения переработки на уровне домохо-

зяйств, анализируя данные более чем 170 000 домов в естественных экспериментах по изучению стимулов. Платформы интегрируют данные пользователей и автоматизируют отчётность. Реализованная методология позволила продемонстрировать, как изменения в стимулирующих механизмах влияют на поведение жителей в отношении переработки.

Представленные исследования указывают на эффективность внедрённых систем, признаётся также, что многоаспектная деятельность по переработке отходов сильно зависит от моделей поведения человека. Стимулы должны адаптироваться к местным культурным контекстам, доступной банковской инфраструктуре, типам отходов, приоритизируемым в регионе, и предпочтениям пользователей на каждом рынке.

Опыт стимулированной переработки в **Казани** [5] представляет проект, возглавляемый компанией РТ-Инвест, входящей в государственную корпорацию Ростех, наиболее заметным и успешным компонентом которого была система автоматических машин переработки – фандоматы, полностью разработанных и произведённых в России.

В 2020 году РТ-Инвест установила 20 фандоматов в казанских школах, что должно было стать «первой значительной сетью автоматических машин переработки в России».

Наиболее интересным аспектом казанского проекта был компонент покупки отходов за наличные деньги у граждан, предусматривающий строительство 18 центров переработки. Проект стал убыточным из-за проблем управления проектом, нарастания задолженности перед кредиторами.

Специализированный анализ управления отходами в России указывает на то, что более реалистичный подход потребовал бы:

1. Предварительного развития систем раздельного сбора, основанных на сообществе.
2. Инвестиций в просвещение граждан, поддерживаемого на протяжении нескольких лет.
3. Строительства комплексов сортировки среднего масштаба, с потенциалом расширения.
4. Гарантирования спроса на рынке вторичного материала.
5. Установления налоговой политики, благоприятствующей переработке в отношении размещения отходов.

Система цифрового отслеживания и бонификации, развёрнутая в городе Реутов частной компанией **TrashBack**, создала систему цифрового отслеживания перерабатываемых отходов от дома до обработки. Компания предоставляет прямые экономические стимулы посредством системы баллов, используемых у региональных торговых партнёров и ВкусВилл.

Движение **ВторПлюс** в городах Санкт-Петербург, Тольятти, Ульяновск, Самара, Нижнекамск реализует платформу покупки-продажи перерабатываемых отходов с внедрением системы баллов. Платформа создаёт прозрачный электронный рынок для торговли вторичным сырьём, предостав-

ляет систему баллов, обменяемых у торговых партнёров (магазины, рестораны), облегчает прямое взаимодействие между гражданами-сборщиками и компаниями переработки. Их система баллов сосредоточена на доставке со специфическими требованиями к размеру и объёму, что обеспечивает больший объём отходов при каждой доставке. Баллы конвертируются в денежные средства в ВкусВилл, Гулливер, Mantra Metro, зоопарке «Богема».

Проект **«Рябина» (Re-bin)**, запущенный в 2022 году, представляет собой мобильное приложение для картирования пунктов приёма вторсырья, системы стимулирования качества в момент сдачи отходов, информирования пользователей о требованиях к сортировке вторичного сырья и формирования региональной базы данных вторичных материальных ресурсов. Оператор проекта – компания «Большая Тройка».

Региональный проект **Нижний Новгород**, развёрнутый в 2015 году в одноименном городе, располагал приложением ECOMAP. Проект включает 7 постоянных пунктов сбора и услугу Ecomovil для домашнего сбора, аккумулирует 50 видов перерабатываемых отходов.

Ежегодная кампания по сбору макулатуры, инициированная в 2015 году и продолжающаяся по сегодняшний день, имеет целью сбор бумаги и картона из школ, организаций и у граждан, повышение осведомлённости о сохранении лесных ресурсов.

Модель переработки с экономическими стимулами

Предложение по переработке отходов с применением экономичных цифровых технологий, внедрённых различными российскими организациями и широко используемых предпринимателями на различных уровнях, может изменить подходы к управлению твёрдыми городскими отходами и обеспечить повышение коэффициента переработки.

Новая модель переработки отходов «Модель» будет структурирована следующим образом:

- **Минимальная инфраструктура объектов и персонала** для сбора, сортировки, обработки и продажи.
- **Минимальная контрольно-надзорная инфраструктура** с чётко определёнными полномочиями.
- **Методологии работы**, организованные посредством процедур для различных участников, связанных с моделью.
- **Взаимодействие** с банковскими системами и автоматизированными платёжными механизмами, социальными услугами, экологическим надзором и налоговым контролем.

Принцип функционирования модели состоит в стимулировании путём выплаты денежных средств (электронных или наличных) или предоставления обменных бонусов в торговых центрах и сетях магазинов через приложение за осуществление следующих действий:

- Сбор и сортировка в источнике перерабатываемых отходов по типам и видам.

- Доставка в **пункты переработки** модели сортированных отходов (для физических лиц).
- Доставка государственными и частными организациями, сетями магазинов и услуг на любом уровне деятельности, а также операторами **«Модели»** перерабатываемых не контаминированных отходов.
- Надлежащее управление отходами на объектах сортировки и обработки.
- Реализация на российском рынке или экспорт.
- Граждане сортируют дома перерабатываемые отходы (пластик, бумагу, картон, стекло) в соответствии с установленными требованиями и доставляют в **пункты переработки Модели** или непосредственно сборщикам Модели. Получают оплату в соответствии с уровнем сортировки. Доходы по этой статье не подлежат налогообложению.
- **Сборщики Модели** могут быть информированы посредством приложения, аналогичного используемым для доставок. Они осуществляют оплату по цене, ниже эквивалента, который получило бы физическое лицо при личной доставке в пункт переработки Модели.
- **Торговые сети и сектор услуг с установленными автоматизированными машинами переработки** будут соучредителями проекта, выступая его партнёрами, создавая стимулы в виде обменных бонусов на товары самого учреждения, магазина или сети магазинов. Доходы от сортированных отходов в автоматах переходят владельцу учреждения или сети магазинов и не подлежат налогообложению.
- **Торговые сети и сектор услуг с пунктами сортировки перерабатываемых отходов** могут закупать у физических лиц сортированные отходы при наличии складского помещения по цене, аналогичной цене для сборщиков, или обменивать их на товары магазина эквивалентной стоимости, при этом продавец сохраняет прибыль. Сумма от продажи исключительно сортированных перерабатываемых отходов, хранящихся и доставленных на Модель, не подлежит налогообложению.
- **Предприятия, фабрики, производственные цехи и иные услуги, генерирующие отходы от крупного производства**, сортируют и хранят свои перерабатываемые отходы в соответствии с видом и категорией, учитывая требования, установленные Моделью. Продают исключительно Модели, представленной её операторами, а не сборщикам или физическим лицам. Сумма от продажи таких отходов не подлежит налогообложению, что поможет им оплатить плату за негативное воздействие на окружающую среду при окончательном размещении иных отходов.

Ни при каких обстоятельствах эти организации не будут продавать отходы в пунктах переработки Модели или третьим лицам

Существующая модель переработки способна достичь целевых показателей, главным образом в области переработки многослойной упаковки и

стекла. Основные препятствия: значительные транспортные расходы, обусловленные расстояниями между источниками генерирования отходов и объектами переработки, а также отсутствие эффективной сортировки в источнике, что ведёт к возрастанию операционных затрат.

Для рассматриваемой модели перспективы рентабельности остаются высокими по следующим причинам:

а) **Масштабируемость**: Реализация начинается в малом масштабе (уровень муниципального района), что снижает первоначальные инвестиционные риски.

б) **Льготный налоговый режим**: Модель не осуществляет платежи за негативное воздействие на окружающую среду, поскольку работает исключительно с отходами Класса IV–V, не образующими экологической опасности.

в) **Субсидирование нерентабельных фракций**: Отходы, такие как стекло, которые при текущих рыночных ценах остаются убыточными, должны субсидироваться государством для компенсации колебаний цены. В противном случае они экономически нежизнеспособны для переработки.

г) **Территориальное расположение**: Центры обработки могут быть размещены в непосредственной близости от города или внутри его границ, поскольку не генерируют опасные отходы Класса I–III.

д) **Оптимизация логистики**: Близость объектов к источникам генерирования отходов существенно снижает транспортные затраты, одну из наибольших статей расходов.

е) **Мобильные технологии переработки**: Использование передвижных установок для обработки чёрных металлов улучшает качество процесса и открывает возможность прямой реализации продукции на металлургические заводы.

ж) **Цифровая инфраструктура**: Применение уже внедрённых электронных платёжных платформ (таких как СБП) ускоряет процесс закупки отходов и одновременно стимулирует производителей к более ответственной сортировке в источнике.

з) **Международная торговля**: Экспорт вторичного сырья, в частности цветных металлов, существенно повышает рентабельность благодаря спросу со стороны стран БРИКС.

Модели переработки отходов с применением экономических стимулов представляют собой действенный инструмент трансформации структуры управления отходами в стране. Хотя на начальных этапах такие модели требуют государственной защиты от убытков и приоритизации на национальном рынке, в среднесрочной перспективе они демонстрируют способность к достижению коммерческой стабильности и устойчивой рентабельности.

В России создана благоприятная среда для электронной коммерции и безопасности банковских переводов любого типа и в любой валюте. Это основной инструмент для повышения коэффициента переработки отходов в стране и поддержки достижения целей, намеченных на 2030 год, в области

обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО). Использование денежных и неденежных стимулов в отношении физических лиц, частного и государственного секторов будет способствовать стимуляции деятельности по переработке отходов. Идея экспериментальной модели обращения с твердыми отходами классов опасности IV и V, адаптированной к условиям России с использованием имеющихся экономическо-финансовых возможностей, представляется рентабельной, обеспечивая ее функционирование в рамках стандартизированных показателей для отраслей переработки. Это положительно скажется на качестве жизни многих граждан, а также на создании новых рабочих мест.

Список литературы

1. Lee, C. K. M., Ng, K. K. H., Kwong, C. K., & Tay, S. C. (2022). Novel mobile application system for implementation of an eco-incentive scheme. Sustainability, 14(6), 3413. https://doi.org/10,3390/su14063413
2. Barteková E, Remtová K. Incentives for plastic recycling: how to engage citizens in active collection. Empirical evidence from Spain. Girona: Universitat de Girona; 2021. Available from: https://dugi-doc.udg.edu/citation/handle/10256/ 19603
3. Thøgersen J. Monetary incentives and recycling: behavioural and psychological reactions to a performance-dependent garbage fee. Resour Conserv Recycl. 2003;39(1):1-27. Available from: https://www.proquest.com/docview/ 198355962
4. Конституция Российской Федерации.
6. Кабаков, Я. (2024, 9 августа). Заявления о рентабельности переработки в России. Вечерняя Казань. https://evening-kazan.ru/articles/ regulators-are-unable-to-make-money-from-garbage-without-help-of-state
7. RECICLA.APP. (2025). RECICLA.APP достигает миллиона операций переработки. https://www.recicla.app
8. Pantamera. (2016). Система залога сохраняет углекислый газ. https://www.pantamera.nu
9. Jaeger, B., & Upadhyay, A. (2023). Resource accounting for a circular economy: Evidence from a digitalised waste management system. Accounting, Auditing & Accountability Journal, 36(3), 831–859. https://doi.org/10,1108/AAAJ-03-2021-5230

Малютина В.О.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
lera.malyutina.01@mail.ru

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В СРЕДУ ОБЩИХ ДАННЫХ (CDE) ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье исследуется потенциал Среды Общих Данных (Common Data Environment, CDE) как интеграционной платформы для реализации систем менеджмента качества в строительной отрасли. Целью исследования является анализ того, каким образом функционал BIM-платформ позволяет автоматизировать применение классических инструментов контроля качества (диаграмма Парето, Исикавы, контрольные карты Шухарта) и обеспечить соблюдение требований международных стандартов ISO 9001 и ISO 19650, На основе анализа современных исследований и функциональных возможностей CDE выявлено, что среда общих данных обеспечивает автоматизацию сбора данных, прослеживаемость информации, формализацию процессов и создание замкнутого цикла управления качеством (Plan-Do-Check-Act). Сделан вывод о том, что CDE выступает цифровым двойником системы менеджмента качества, объединяющим классические методы, современные стандарты и цифровые инструменты на протяжении всего жизненного цикла объекта строительства.

Ключевые слова: информационное моделирование зданий (BIM), среда общих данных (CDE), управление качеством, ISO 19650, контрольные карты Шухарта, цифровизация строительства, TQM, BCF.

Malyutina V.O.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
lera.malyutina.01@mail.ru

INTEGRATION OF QUALITY MANAGEMENT METHODS AND SYSTEMS INTO A COMMON DATA ENVIRONMENT (CDE) FOR BUILDING INFORMATION MODELING

Abstact. This article explores the potential of the Common Data Environment (CDE) as an integration platform for implementing quality management systems in the construction industry. The aim of this study is to analyze how BIM platform functionality enables the automation of traditional quality control tools (Pareto diagram, Ishikawa diagram, Shewhart control chart) and ensures compliance with the requirements of international standards ISO 9001 and ISO 19650, Based on an analysis of current research and the functional capabilities of the CDE, it was found that the CDE facilitates automated data collection, information traceability, process formalization, and the creation of a closed-loop quality management system (Plan-Do-Check-Act). It is concluded that the CDE serves as a digital twin of the quality management system, integrating traditional methods, modern standards, and digital tools throughout the entire lifecycle of a construction project.

Keywords: building information modeling (BIM), common data environment (CDE), quality management, ISO 19650, Shewhart control chart, digitalization of construction, TQM, BCF.

Перечень сокращений и условных обозначений

В настоящей статье применяются следующие сокращения:

- BEP (BIM Execution Plan) – план выполнения BIM-проекта;
- BCF (BIM Collaboration Format) – открытый формат для обмена замечаниями и коллизиями между BIM-приложениями;
- BIM (Building Information Modelling) – информационное моделирование зданий;
- CDE (Common Data Environment) – среда общих данных;
- DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) – методология «шести сигм» (определение, измерение, анализ, улучшение, контроль);
- EIR (Exchange Information Requirements) – требования к обмену информацией;
- KPI (Key Performance Indicators) – ключевые показатели эффективности;
- LOIN (Level of Information Need) – уровень потребности в информации;
- PIM (Project Information Model) – информационная модель проекта;
- QA (Quality Assurance) – обеспечение качества;
- QC (Quality Control) – контроль качества;
- SPC (Statistical Process Control) – статистическое управление процессами;
- TQM (Total Quality Management) – всеобщее управление качеством.

Современное строительство характеризуется усложнением инженерных систем, сокращением сроков реализации проектов и повышением требований к безопасности объектов. В этих условиях традиционные методы управления качеством, основанные на бумажном документообороте и постфактум-контроле, демонстрируют недостаточную эффективность. Парадигма всеобщего управления качеством (Total Quality Management, TQM), а также инструментарий «шести сигм» и «бережливого производства» требуют оперативного получения достоверных данных для анализа и принятия решений.

Информационное моделирование зданий (Building Information Modelling, BIM) и, в частности, концепция Среды Общих Данных (Common Data Environment, CDE) предлагают инфраструктурное решение данной проблемы. Согласно исследованию С. Сейис и С. Озкан, внедрение CDE на этапе строительства BIM-проектов положительно влияет на ключевые показатели эффективности, в первую очередь – на производительность, качество и соблюдение сроков [5]. Однако вопрос о том, насколько полно функционал существующих BIM-платформ интегрирует классические методы управления качеством, остается недостаточно изученным. Настоящая статья ставит целью восполнить этот пробел и обосновать тезис о том, что CDE выступает в роли интеграционной платформы для систем менеджмента качества.

Информационное моделирование зданий (BIM): структура, цели и обзор исследований

Информационное моделирование зданий (Building Information Modelling, BIM) представляет собой комплексный подход к проектированию, строительству и эксплуатации объекта капитального строительства, основанный на создании и использовании цифровой информационной модели, содержащей не только геометрические, но и атрибутивные, стоимостные и эксплуатационные данные. Как отмечается в систематическом обзоре литературы Х. Абдирада, BIM объединяет в себе три фундаментальных компонента: технологии (программное обеспечение и аппаратное обеспечение), процессы (регламенты взаимодействия) и людей (компетенции и роли участников) [7].

Структурно BIM-модель может быть представлена на нескольких уровнях:

1. Геометрический уровень – трехмерное представление объекта с детализацией геометрии элементов;
2. Атрибутивный уровень – параметрические характеристики элементов (материалы, размеры, технические показатели);
3. Управленческий уровень – временные (4D), стоимостные (5D) и эксплуатационные (6D) данные, интегрированные в модель [2].

Важнейшей концепцией в структуре BIM является уровень потребности в информации (Level of Information Need, LOIN), который пришел на смену ранее использовавшемуся понятию «уровень детализации» (Level of Development, LOD). Согласно стандарту ISO 7817-1:2024, уровень потребности в информации определяет объем, детализацию и атрибутивный состав информации, необходимой для достижения конкретных целей на каждом этапе жизненного цикла объекта [10]. Как отмечает М. Болпаньи – ведущий разработчик стандарта EN 17412-1, переход к концепции LOIN позволяет более точно формулировать требования к информации и автоматизировать процессы ее проверки [1].

Ключевые цели внедрения BIM в строительных проектах систематизированы в ряде исследований. Согласно обзору Р. Харо и К. Пинас, внедрение BIM в инвестиционно-строительных проектах позволяет достичь следующих количественных результатов: снижение затрат на 15–23%, сокращение сроков реализации на 18–28%, уменьшение количества несоответствий и нарушений на 25–40% [4]. В более широком контексте, как отмечается в исследовании Ф. Адежолы и Э. Нвободо-Анядиегву, BIM способствует повышению производительности, улучшению безопасности труда и достижению целей устойчивого развития [9].

На стратегическом уровне внедрение BIM направлено на:

- создание единого информационного пространства для всех участников инвестиционно-строительного процесса;
- минимизацию коллизий и ошибок на ранних стадиях проектирования;

• обеспечение прослеживаемости (traceability) информации на протяжении всего жизненного цикла объекта;

• интеграцию с системами менеджмента качества, безопасности и экологической устойчивости [2, 7].

Анализ научной литературы за период 2017–2025 гг. позволяет выделить несколько ключевых направлений исследований в области BIM и управления качеством.

Первое направление связано с изучением влияния BIM на ключевые показатели эффективности проектов. В работе С. Сейис и С. Озкан показано, что использование CDE положительно влияет на качество проектной документации и строительно-монтажных работ, а также на соблюдение сроков и бюджета [5]. Второе направление фокусируется на разработке метрик и критериев оценки BIM-реализации. Х. Абдирад выделяет более 50 показателей, используемых для оценки эффективности BIM, среди которых – количество выявленных коллизий, время цикла согласования, точность атрибутивных данных [7].

Третье направление, наиболее актуальное для настоящего исследования, связано с интеграцией принципов бережливого производства (lean construction) и управления качеством в BIM-процессы. Исследование С. Бхаттачарья и А. Матхур демонстрирует, что BIM вносит значительный вклад в реализацию таких принципов lean-концепции, как устранение потерь, Кайдзен (непрерывное совершенствование) и встроенное качество [7]. Работы О. Шоха подтверждают возможность успешной интеграции методов управления качеством из автомобилестроения (QFD, FMEA) в архитектурно-строительное проектирование на базе информационных моделей [8].

Теоретические основы управления качеством в строительстве

Управление качеством в строительной отрасли исторически базируется на двух взаимосвязанных компонентах: обеспечении качества (Quality Assurance, QA) – проактивных действиях, направленных на создание уверенности в выполнении требований к качеству, и контроле качества (Quality Control, QC) – реактивных действиях по выявлению и устранению несоответствий.

Классическим инструментарием для выявления причин дефектов служат семь инструментов качества, включающих диаграмму Парето, диаграмму Исикавы (причинно-следственную), контрольные карты Шухарта, гистограммы, листы сбора данных, диаграммы рассеивания и потоковые диаграммы [1]. В работах К. Исикавы подчеркивалось, что эффективность данных инструментов напрямую зависит от качества и полноты исходных данных, а также от оперативности их получения [1].

В условиях цифровой трансформации строительной отрасли актуальность приобретает интеграция указанных инструментов в единую информационную среду. Как отмечают Дж. Линдхольм с соавторами, современные компании демонстрируют значительный разрыв в уровне знаний о требованиях CDE, установленных стандартом ISO 19650, что затрудняет переход от

программно-ориентированных решений к решениям, ориентированным на управление данными [6]. Это подтверждает необходимость более глубокого исследования интеграционных возможностей BIM-платформ.

Среда общих данных (CDE) как основа интеграции

Согласно определению, приведенному в стандарте ISO 19650-1:2018, Среда Общих Данных (Common Data Environment, CDE) представляет собой «согласованный источник информации для любого конкретного проекта или актива, предназначенный для сбора, управления и распространения каждого информационного контейнера посредством управляемого процесса» [4]. Как отмечается в материалах Европейского комитета по стандартизации (CEN/TC 442), CDE включает в себя два неразрывных аспекта: workflow (описание процессов управления информацией) и solution (технологическую платформу, реализующую эти процессы) [8].

Фундаментальным принципом CDE является разделение информации на четыре статусные зоны:

Работа в процессе (Work In Progress, WIP) – информация, разрабатываемая автором или командой, недоступная для других участников;

Общая зона (Shared) – информация, прошедшая первичную проверку и доступная для обмена между командами;

Опубликованная зона (Published) – информация, утвержденная и разрешенная к использованию для проектирования, строительства или эксплуатации;

Архив (Archive) – информация, фиксирующая историю транзакций и обеспечивающая аудиторский след [3].

Данная статусная модель обеспечивает контроль целостности и актуальности информации, что является необходимым условием для управления качеством.

Трансформация классических инструментов контроля качества в среде CDE

Проведенный анализ функциональных возможностей современных BIM-платформ (Autodesk Construction Cloud, BIMcollab, Dalux и др.) позволяет утверждать, что CDE автоматизирует процесс сбора первичных данных и трансформирует применение классических инструментов качества.

1. Диаграмма Парето и BCF-аналитика

Использование открытого формата BCF (BIM Collaboration Format) для фиксации замечаний превращает каждый акт выявления несоответствия в структурированную запись в базе данных. Накопление таких записей создает основу для автоматического построения диаграмм Парето, позволяющих идентифицировать наиболее частотные типы коллизий или ошибок моделирования. Как отмечают А. Боррманн с соавторами, возможность автоматической классификации и агрегации данных о коллизиях является ключевым преимуществом BIM-подхода перед традиционными методами координации [2]. Это соответствует принципу «управления на основе фактов», декларируемому в стандартах ISO 9000,

2. Причинно-следственный анализ (диаграмма Исикавы)

Функция контроля версий и полного аудита действий (логирования) в CDE предоставляет аналитический материал для построения причинно-следственных диаграмм. При возникновении критического дефекта платформа позволяет восстановить полную хронологию работы с информацией: определить исполнителя, использованный источник данных (например, версию геоподосновы), время утверждения и смежные изменения. Исследования У. Кайя и О. Озенера подтверждают, что именно прослеживаемость (traceability) информации, обеспечиваемая CDE в соответствии с требованиями ISO 19650-2, создает необходимые условия для эффективного аудита и поиска коренных причин проблем [6].

3. Цифровые аналоги контрольных карт Шухарта

Особого внимания заслуживает реализация принципов статистического управления процессами (Statistical Process Control, SPC). В классической теории контрольные карты Шухарта служат для отслеживания стабильности процесса во времени и выявления особых причин вариабельности [3].

В среде CDE на этапе строительства данный метод реализуется через модули полевого контроля (Field Quality Management). Посредством мобильных приложений, интегрированных с платформой, фиксируются результаты инспекций, приемки работ и выявленные дефекты. Аналитический модуль CDE автоматически рассчитывает частоту дефектов на заданный период (например, неделю) и сопоставляет ее с контрольными границами. Выход процесса за верхнюю контрольную границу служит триггером для автоматического оповещения ответственных лиц, что соответствует переходу от реактивной фазы контроля (QC) к проактивным корректирующим действиям (QA).

Интеграция современных подходов к управлению качеством

1. Стандартизация: ISO 9001 и ISO 19650

Интеграционная роль CDE наиболее ярко проявляется в контексте требований международных стандартов. Стандарт ISO 19650 «Организация и оцифровка информации о зданиях и сооружениях, включая информационное моделирование зданий (BIM)» прямо предписывает использование Среды Общих Данных для управления информационными контейнерами [4]. Как отмечается в исследовании, посвященном внедрению международных стандартов в инновационные компании, синергия требований ISO 19650 и ISO 9001 создает комплексную основу для обеспечения экономической безопасности бизнес-процессов и управления качеством [5].

Раздел 7.5 стандарта ISO 9001 «Управление документированной информацией» требует контроля версий, доступности и защиты документов. CDE автоматически реализует данные требования, исключая человеческий фактор и обеспечивая функционирование единого источника достоверных данных (Single Source of Truth).

2. Концепция Кайдзен (Kaizen) и непрерывное улучшение

Интеграция принципов бережливого производства и BIM-технологий представляет собой перспективное направление повышения эффективности строительных проектов. Исследование С. Бхаттачарья и А. Матхур демонстрирует, что применение BIM вносит значительный вклад в реализацию таких принципов lean-концепции, как устранение потерь, Кайдзен (непрерывное совершенствование), уважение к человеку и встроенное качество [7].

В контексте CDE принципы Кайдзен реализуются через аналитические панели (дашборды), позволяющие оценивать эффективность внедренных улучшений. Измерение ключевых показателей процесса (KPI), таких как время цикла проверки документации или количество итераций согласования, создает основу для принятия обоснованных управленческих решений.

3. Методология «Шесть сигм» (Six Sigma)

Методология DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) находит прямое отражение в функционале CDE. Этап определения (Define) реализуется через хранение требований к информации (Exchange Information Requirements, EIR) и планов выполнения BIM-проекта (BIM Execution Plan, BEP). Измерение (Measure) обеспечивается автоматическим сбором метрик о количестве дефектов и сроках выполнения задач. Анализ (Analyze) базируется на BCF-аналитике и инструментах визуализации данных. Улучшение (Improve) достигается корректировкой рабочих процессов непосредственно в интерфейсе платформы. Контроль (Control) обеспечивается настройкой автоматических триггеров и уведомлений при выходе показателей за допустимые пределы.

4. Бенчмаркинг и управление знаниями

Накопление данных по нескольким проектам в единой платформе создает базу для сравнительного анализа эффективности реализации различных проектов и выявления лучших практик. Как отмечается в исследовании С. Сейис и С. Озкан, одним из ключевых преимуществ CDE является возможность использования накопленных данных не только для управления текущими проектами, но и для управления знаниями в масштабах организации [5]. Это позволяет трансформировать индивидуальный опыт отдельных сотрудников в организационный капитал компании.

Обобщая проведенный анализ, можно предложить концептуальную архитектуру интегрированной системы управления качеством, реализуемой на базе BIM-платформы с функционалом CDE. Данная архитектура включает три взаимосвязанных уровня:

Уровень сбора данных (Data Collection Layer): Мобильные приложения для полевого контроля, интерфейсы для фиксации замечаний в формате BCF, автоматическое логирование действий пользователей, интеграция с датчиками и IoT-устройствами.

Уровень аналитики и обработки (Analytics Layer): Инструменты статистического анализа, модули для построения диаграмм Парето и гистограмм,

алгоритмы выявления трендов и аномалий, средства визуализации данных и формирования отчетности.

Уровень управления процессами (Process Management Layer): Механизмы управления версиями и доступа, формализованные workflow согласования и утверждения, интеграция с календарным планированием, модули оповещения и эскалации проблем.

Как подчеркивается в работе М. Болпаньи и соавторов, посвященной методологиям Индустрии 4.0 для строительной отрасли, именно интеграция указанных уровней в единой цифровой платформе создает условия для эффективного управления качеством на протяжении всего жизненного цикла объекта [8].

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что BIM-платформа с функционалом Среды Общих Данных (CDE) представляет собой не просто эволюцию проектного документооборота, а качественно новый уровень реализации системы менеджмента качества в строительстве. Интеграция классических инструментов контроля качества в цифровую среду обеспечивает:

1. Автоматизацию сбора данных, что повышает достоверность и оперативность анализа по сравнению с ручными методами.
2. Прослеживаемость всей истории работы с информацией, что является необходимым условием для аудита и поиска первопричин дефектов.
3. Формализацию процессов в строгом соответствии с требованиями ISO 19650 и ISO 9001, что снижает риски, связанные с человеческим фактором [5].
4. Создание замкнутого цикла управления качеством (цикл Деминга), где результаты контроля (QC) служат основой для корректировки процессов обеспечения качества (QA).
5. Накопление организационных знаний для последующего бенчмаркинга и непрерывного улучшения [5].

Таким образом, CDE выступает в роли интеграционной платформы, объединяющей классические методы, современные стандарты и цифровые инструменты в единую систему управления качеством на протяжении всего жизненного цикла объекта капитального строительства. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на разработку методик количественной оценки эффективности внедрения таких интегрированных систем и исследование возможностей применения технологий искусственного интеллекта для предиктивного анализа качества на основе данных, накапливаемых в CDE.

Список литературы

1. Исикава К. Японские методы управления качеством / Сокр. пер. с англ. – Москва: Экономика, 1988. – 215 с.

2. Borrmann A., König M., Koch C., Beetz J. Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice. – Springer International Publishing, 2018. – 584 p. DOI: 10,1007/978-3-319-92862-3.

3. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Пер. с англ. – Москва: Альпина Паблишер, 2016. – 409 с.

4. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) – Information management using building information modelling – Part 1: Concepts and principles. – Текст: электронный. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – URL: https://www.iso.org/standard/68080,html (дата обращения: 26.04.2026).

5. Seyis S., Özkan S. Analyzing the added value of common data environments for organizational and project performance of BIM-based projects // Journal of Information Technology in Construction. – 2024. – Vol. 29. – P. 247-263. DOI: 10,36680/j.itcon.2024.012.

6. Lindholm J., Johansson P., Yitmen I. Toward a BIM information delivery framework based on common data environment // Construction Innovation. – 2025. – Vol. 25, No. 7. – P. 139-157. DOI: 10,1108/CI-06-2024-0185.

7. Abdirad H. Metric-Based BIM Implementation Assessment: A Review of Research and Practice // Architectural Engineering and Design Management. – 2017. – Vol. 13, No. 1. – P. 52-78. DOI: 10,1080/17452007.2016.1183474.

8. Bolpagni M., et al. Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies and Skills. – Springer, 2022. – Chapter 15: Quality Management for the Built Environment (G. La Rocca). – P. 321–345. DOI: 10,1007/978-3-030-82430-6.

9. Adejola F.O., Nwobodo-Anyadiegwu E.N. Digital Technologies for Sustainable Construction Project Management: A Systematic Review of Benefits and Challenges // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, No. 24. – Article 11247. DOI: 10,3390/su172411247.

10. ISO 7817-1:2024. Building information modelling – Level of information need – Part 1: Concepts and principles. – Текст: электронный. – Geneva: International Organization for Standardization, 2024. – URL: https://www.iso.org/standard/82906.html (дата обращения: 26.04.2026).

Знахаренко А.Д.
студент
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Россия, Саратов
znakharenko0,ru@bk.ru
Винокурова С.А.
доцент кафедры «Материаловедение, технология и управление качеством»
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Россия, Саратов
savinokurova.kmtqm@yandex.ru
Соловьева В.А.
к.п.н., доцент кафедры «Материаловедение, технология и управление качеством»
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Россия, Саратов
solovyovava@info.sgu.ru

«ЧЕСТНЫЙ ЗНАК» КАК ИНСТРУМЕНТ ОБЩЕСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ В СТАНДАРТИЗАЦИИ И ЦИФРОВОЙ МЕТРОЛОГИИ: КОМПЛЕКСНЫЙ ОБЗОР МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

Аннотация. В статье представлен комплексный обзор национальной системы цифровой маркировки «Честный знак» и ее потребительского интерфейса – мобильного приложения. Актуальность исследования обусловлена расширением перечня маркируемых товаров и внедрением единых национальных стандартов в области цифровой прослеживаемости. В теоретической части рассмотрены принципы уникальной идентификации продукции в контексте ГОСТ и методологии управления цепями поставок. Практическая часть содержит функциональный анализ приложения, оценку пользовательского опыта и статистические данные об эффективности системы за 2025–2026 гг. Особое внимание уделено интеграции приложения с сервисами «Госуслуги» и механизмам общественного контроля. Сделаны выводы о роли стандартизации в обеспечении качества и безопасности продукции.

Ключевые слова: честный знак, цифровая маркировка, Data Matrix, стандартизация, уникальная идентификация, ГОСТ, общественный контроль, прослеживаемость товаров.

Znakharenko A. D.
Student
Saratov State University
Russia, Saratov
znakharenko0,ru@bk.ru
Vinokurova S.A.
Associate Professor of the Department of Materials Science, Technology and Quality Management
Saratov State University
Russia, Saratov
savinokurova.kmtqm@yandex.ru
Solovyova V.A.
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

of the Department of Materials Science, Technology and Quality Management
Saratov State University
Russia, Saratov
solovyovava@info.sgu.ru

«CHESTNYJ ZNAK» AS A TOOL FOR PUBLIC CONTROL IN STANDARDIZATION AND DIGITAL METROLOGY: A COMPREHENSIVE REVIEW OF THE MOBILE APPLICATION

Abstract. This article presents a comprehensive review of the national digital marking system «Honest Sign» and its consumer interface – the mobile application. The relevance of the study is driven by the expansion of the list of marked goods and the implementation of unified national standards in the field of digital traceability. The theoretical part examines the principles of unique product identification in the context of GOST and supply chain management methodology. The practical part includes a functional analysis of the application, an assessment of user experience, and statistical data on the system's effectiveness for 2025–2026. Special attention is paid to the integration of the application with the «Gosuslugi» portal and the mechanisms of public control. Conclusions are drawn regarding the role of standardization in ensuring product quality and safety.

Keywords: Honest Sign, digital marking, Data Matrix, standardization, unique identification, GOST, public control, product traceability.

Современный потребительский рынок сталкивается с беспрецедентным давлением со стороны контрафактной и фальсифицированной продукции. По данным Центра развития перспективных технологий (ЦРПТ), оператора государственной системы маркировки «Честный знак», только за девять месяцев 2025 года было зафиксировано свыше 50 миллионов нарушений при продажах на маркетплейсах. В этих условиях цифровая маркировка становится ключевым инструментом обеспечения прозрачности товаропроводящей цепи и защиты прав потребителей.

Мобильное приложение «Честный ЗНАК» выступает пользовательским интерфейсом национальной системы цифровой маркировки и прослеживаемости товаров, позволяя любому гражданину в режиме реального времени проверить легальность и качество приобретаемой продукции. По состоянию на 2026 год система охватывает десятки товарных групп – от лекарственных препаратов и молочной продукции до обуви, парфюмерии и радиоэлектронной техники.

Цель настоящей статьи – провести комплексный анализ мобильного приложения «Честный ЗНАК» с позиций стандартизации, цифровой метрологии и практической применимости для конечного потребителя. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

Рассмотреть теоретические основы уникальной идентификации товаров в контексте действующих стандартов.

Проанализировать архитектуру и функциональные возможности приложения.

Оценить эффективность системы на основе статистических данных.

Сформулировать перспективы развития цифровой маркировки в Российской Федерации.

Исследование носит комплексный характер и базируется на сочетании теоретического анализа нормативно-правовой базы, практического тестирования функционала мобильного приложения и статистической оценки эффективности системы цифровой маркировки.

Методологической основой исследования выступает системный подход к анализу цифровой прослеживаемости товаров. В качестве базовых методов использованы:

Анализ нормативно-технической документации – изучение действующих стандартов ГОСТ ISO/IEC 15459, ГОСТ Р ИСО/МЭК 16022 и постановлений Правительства РФ, регламентирующих обязательную маркировку товаров.

Функционально-структурный анализ – исследование архитектуры и пользовательских сценариев мобильного приложения.

Сравнительный анализ – сопоставление показателей до и после внедрения обязательной маркировки по различным товарным группам.

Практическая часть исследования включала следующие этапы:

1. Установка и настройка приложения. В рамках этого пункта проводилось исследование возможностей приложения с разными способами авторизации: без регистрации, по номеру телефона и через учетную запись портала «Госуслуги».
2. Сканирование кодов маркировки. С помощью приложения проводилась проверка товаров из различных категорий в розничных точках продаж.
3. Анализ дополнительных функций. Были изучены сервисы интерактивной карты магазинов, механизма подачи жалоб и интеграции с государственными порталами.
4. Оценка пользовательского опыта. Была проведена оценка стабильности работы и удобства навигации внутри приложения.

Следует заметить, что исследование не включает анализ бизнес-версии приложения «ЧЗ.Бизнес», так как оно ориентированно на субъекты малого и среднего предпринимательства.

Маркировка товаров – это процесс нанесения специальных знаков, кодов или идентификаторов для идентификации товара и контроля за его оборотом, которая необходима для обеспечения прозрачности и защиты интересов потребителей [1–3]. Цифровая маркировка товаров в Российской Федерации регулируется комплексом нормативно-правовых актов, ключевым из которых является Распоряжение Правительства РФ от 28 апреля 2018 г. № 791-р, устанавливающее модель функционирования системы маркировки. Постановлением Правительства РФ от 29 декабря 2025 г. № 2192 внесены существенные изменения в нормативные правовые акты, касающиеся обязательной маркировки средствами идентификации, которые вступили в силу 1 марта 2026 года [4].

Оператором государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров определен ООО «Оператор-ЦРПТ» (Центр развития

перспективных технологий), действующий на основании соглашения с Минпромторгом России. С 1 сентября 2025 года полномочия ЦРПТ как оператора системы были расширены – теперь система не просто фиксирует наличие разрешительных документов, но и в автоматическом режиме проверяет их подлинность и соответствие.

С точки зрения стандартизации, цифровая маркировка базируется на принципах уникальной идентификации единиц продукции, регламентированных серией стандартов ГОСТ ISO/IEC 15459:

ГОСТ ISO/IEC 15459-1 – устанавливает общие требования к уникальной идентификации единиц транспортируемой продукции и предметов торговли [5].

ГОСТ ISO/IEC 15459-4 – определяет уникальную строку знаков для идентификации штучных изделий и упакованных единиц продукции, предназначенную для представления в линейном или двумерном символе штрихового кода [6].

ГОСТ ISO/IEC 15459-6 – регламентирует уникальную идентификацию групп продукции, лишенную семантического смысла строку знаков [7].

В качестве средства идентификации в системе «Честный знак» используется двумерный штриховой код в формате Data Matrix, наносимый в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО/МЭК 16022-2008 «Автоматическая идентификация. Кодирование штриховое. Спецификация символики Data Matrix» [8]. Пример штрихового кода можно увидеть на рисунке 1.



Рис. 1. Пример штрих-кода “Data Matrix»

Код маркировки включает четыре группы данных: первая и вторая группы образуют код идентификации товара, содержащий 14-значный код товара в формате GTIN (Global Trade Item Number) с идентификатором применения AI=’01’, а третья и четвертая группы формируют код проверки, обеспечивающий криптографическую защиту и верификацию подлинности.

Data Matrix представляет собой цифровой «отпечаток» товара, который в зашифрованном виде содержит информацию о производителе и характеристиках продукции. С 2025 года в России действует актуализированный ГОСТ ISO/IEC 16022-2025, устанавливающий требования к символике Data Matrix, параметрам качества печати и алгоритмам декодирования [9].

Росстандарт анонсировал разработку единого национального стандарта по цифровой маркировке и прослеживаемости продукции. Планируется, что ГОСТ «Система цифровой маркировки и прослеживаемости продукции: ключевые требования. Термины и определения» будет разработан и введен в эксплуатацию во второй половине 2026 года. Документ призван стандартизировать цифровые решения, что поможет минимизировать риски сбоев, предотвратить блокировку оборота товаров и обеспечить совместимость программного обеспечения с системами учета и контрольно-кассовой техникой.

В перспективе единый ГОСТ может быть предложен для внедрения на межгосударственном уровне в странах ЕАЭС.

Приложение «Честный ЗНАК» доступно для бесплатного скачивания в официальных магазинах приложений: App Store, Google Play, RuStore, AppGallery. Также возможна установка через портал «Госуслуги» и официальный сайт системы.

Пользователю предлагается три способа авторизации:

• Без регистрации – режим с ограниченным функционалом, позволяющий только сканировать коды Data Matrix и получать базовую информацию о товаре.

• По номеру телефона – полноценный доступ ко всем функциям приложения с подтверждением через SMS-код.

• Через «Госуслуги» – интеграция с единой системой идентификации и аутентификации (ЕСИА), обеспечивающая максимальный уровень верификации пользователя.

На главном экране приложения в нижней части экрана стилистически выделена кнопка сканирования кода формата “Data Matrix», что показано на рисунке 2. Просканировав код маркировки, пользователь получает такую информацию о товаре, как наименование продукции и производитель, реальный срок годности и состав, статус товара в системе (легальный или нелегальный), а также сведения о вводе товара в оборот.

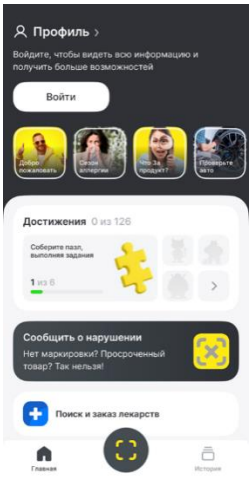


Рис. 2. Главное меню приложения «Честный ЗНАК»

Приложение работает в офлайн-режиме для сканирования, однако для проверки данных требуется подключение к интернету. Поддерживаемые товары включают лекарства, БАДы, медицинские изделия, обувь, табак, молочную продукцию, упакованную воду, товары легкой промышленности и другие категории.

В разделе «Мои покупки» реализована функция проверки сразу всех маркируемых товаров по QR-коду на кассовом чеке. Приложение также направляет уведомление за сутки до истечения срока годности товаров, что особенно актуально для скоропортящейся продукции.

В ноябре 2025 года в приложении появилась интерактивная карта с рейтингом магазинов по всей России. Этот функционал позволяет потребителям находить «зеленые» торговые точки, которые не продают контрафакт, избегать магазинов, замеченных в нарушениях правил маркировки, а также отслеживать статус ранее поданных обращений.

Функционал приложения постоянно расширяется, превращая его из простого инструмента проверки легальности товара в полноценного помощника потребителя.

Ключевым элементом системы является механизм общественного контроля. Если приложение не находит информацию о коде маркировки, сообщает о проблемах или выявляет несоответствие описания товара фактическому, пользователь может сообщить о нарушении непосредственно через интерфейс приложения. Жалоба направляется в соответствующие контрольно-надзорные органы, включая Роспотребнадзор.

Приложение умеет сканировать не только коды Data Matrix, но и штрих-коды, значки, нанесенные производителем на упаковку (например, об экологичности), а также коды с чеков.

В 2026 году значительно расширилась интеграция приложения с порталом «Госуслуги». Пользователи могут сканировать коды маркировки непосредственно через встроенный сканер «Госкан» в приложении «Госуслуги», не устанавливая отдельное приложение «Честный ЗНАК». Это существенно упрощает доступ к системе для широкой аудитории.

Практическое тестирование приложения выявило как удобные и продуманные сильные стороны, так и недостатки. К достоинствам можно отнести интуитивно понятный интерфейс и быстрое распознавание кодов, наличие офлайн-режима сканирования, регулярное обновление базы товаров и расширение функционала, а также интеграцию с государственными сервисами. Среди недостатков и ограничений отмечаются периодические технические сбои и отсутствие доступа к полному функционалу без регистрации.

По состоянию на конец 2025 года в системе «Честный знак» зарегистрировано 970 тысяч компаний-участников оборота. За 2025 год маркировка распространилась на 9 новых отраслей, а разрешительный режим был расширен еще на 7 товарных категорий. Всего система заблокировала продажу 2,7 млрд единиц небезопасных и нелегальных товаров.

Внедрение цифровой маркировки продемонстрировало значительные результаты в борьбе с фальсификатом:

• Уровень фальсификата в молочной продукции снизился в сотни раз и достиг показателя 0,01% [10].

• Выручка легальных производителей обуви удвоилась после введения обязательной маркировки.

• Доля контрафактной икры на рынке сократилась в 50 раз.

• В течение 2025 года система зафиксировала свыше 50 миллионов нарушений реализации товаров на маркетплейсах, что позволило оперативно блокировать нелегальные поставки [11].

С 1 марта 2026 года вступили в силу изменения, расширяющие перечень товаров, подлежащих обязательной маркировке, включая БАДы в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 28 ноября 2025 г. № 1953. С 1 мая 2026 года производители и импортеры радиоэлектронной продукции обязаны наносить маркировку и подавать сведения о вводе в оборот в систему «Честный знак» [12].

С 1 октября 2025 года стартовал добровольный эксперимент по маркировке товаров для дома, включающий посуду, средства для уборки, предметы интерьера и декора. Эксперимент продлится до 31 августа 2026 года. Параллельно с 25 сентября 2025 года проводится эксперимент по маркировке средств личной гигиены и хозяйственных товаров.

По данным ЦРПТ, приложение «Честный ЗНАК» скачали более 30 миллионов пользователей, было просканировано свыше 370 миллионов товаров [10]. Интеграция с «Госуслугами» и создание интерактивной карты магазинов способствуют росту вовлеченности граждан в систему общественного контроля.

Проведенное исследование позволяет сформулировать вывод о том, что система «Честный знак» является эффективным инструментом цифровой прослеживаемости товаров, базирующимся на международных и национальных стандартах уникальной идентификации продукции. Использование двумерного кода Data Matrix в соответствии с ГОСТ обеспечивает надежную криптографическую защиту и возможность верификации подлинности товара. Мобильное приложение «Честный ЗНАК» предоставляет потребителю комплексный функционал для проверки легальности и качества продукции, включая сканирование кодов маркировки, контроль сроков годности, доступ к интерактивной карте магазинов и механизм подачи жалоб. Внедрение цифровой маркировки демонстрирует значимые экономические и социальные эффекты: снижение доли контрафакта в десятки и сотни раз, рост выручки легальных производителей, блокировку миллиардов единиц небезопасной продукции. Перспективы развития системы связаны с унификацией стандартов – разработкой единого национального ГОСТа по цифровой маркировке и прослеживаемости продукции, который может

быть внедрен на уровне стран ЕАЭС, а также с поэтапным расширением перечня маркируемых товаров.

Таким образом, цифровая маркировка и ее потребительский интерфейс в виде мобильного приложения представляют собой успешный пример государственно-частного партнерства в сфере стандартизации и защиты прав потребителей, обеспечивающий прозрачность товаропроводящей цепи и формирующий культуру ответственного потребления.

Список литературы

1. Соин И.Р. Маркировки и их представленность на российском рынке // В сборнике: Инновационные технологии в науке: управление качеством, метрологическое обеспечение, новые подходы и цифровизация производства в сфере АПК. Сборник научных материалов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием. Саратов, 2024. С. 203–210,
2. Юмаев Я.М., Соловьева В.А., Винокурова С.А. Система маркировки для контроля оборота товаров // В сборнике: Инновационные технологии в науке: управление качеством, метрологическое обеспечение, новые подходы к автоматизации и роботизации производственных процессов. Сборник научных материалов III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием. Саратов, 2025. С. 92–97.
3. Винокурова С.А. Система экологического менеджмента как средство обеспечения экологического контроля // В сборнике: Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2019. Сборник трудов XXXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов. Под общей редакцией В.И. Жулева. 2019. С. 245–247.
4. Постановление Правительства РФ от 29.12.2025 № 2192 «О внесении изменений в нормативные правовые акты, касающиеся обязательной маркировки средствами идентификации»// Правительство Российской Федерации. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202512300035?index=1 (дата обращения: 20,04.2026).
5. ГОСТ ISO/IEC 15459-1-2016. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных. Идентификация уникальная. Часть 1. Индивидуальные транспортируемые единицы [Электронный ресурс] //МЕГАНОРМ. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293749/4293749249.pdf (дата обращения: 20,04.2026).
6. ГОСТ ISO/IEC 15459-4-2016. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных. Идентификация уникальная. Часть 4. Штучные изделия и упакованные единицы продукции [Электронный ресурс]// Библиотека нормативной документации. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293749/4293749228.pdf (дата обращения: 20,04.2026).
7. ГОСТ ISO/IEC 15459-6-2016. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных. Идентификация уникальная. Часть 6. Группы [Электронный ресурс]// Библиотека нормативной документации. URL: https://files.stroyinf.ru/Data/640/64023.pdf (дата обращения: 20,04.2026).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 16022-2008. Автоматическая идентификация. Кодирование штриховое. Спецификация символики Data Matrix [Электронный ресурс] // МЕГАНОРМ. URL: https://meganorm.ru/Data/481/48152.pdf (дата обращения: 20,04.2026).
9. ГОСТ ISO/IEC 16022-2025. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных. Спецификация символики штрихового кода

Data Matrix [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_522255/ (дата обращения: 20,04.2026).

1. “Маркировка «Честный знак» снизила фальсификат в молочной продукции до 0,01%» [Электронный ресурс]// Вести. 31.10,2025. URL: https://www.vesti.ru/article/4760535(дата обращения: 20,04.2026).

10. «Честный знак» зарегистрировал свыше 50 млн нарушений продаж на маркетплейсах [Электронный ресурс] // ТАСС. 7.10,2025. URL: https://tass.ru/ekonomika/25275183 (дата обращения: 20,04.2026).

11. Постановление Правительства РФ от 28.11.2025 № 1953 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 31 мая 2023 г. № 886» // Официальный интернет-портал правовой информации. 29.11.2025. № опубликования: 0001202511290035. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202511290035 (дата обращения: 20,04.2026).

1. Россияне проверили в приложении Честный ЗНАК 370 миллионов товаров [Электронный ресурс] // Markirovka.ru. 23.10,2025. URL: https://markirovka.ru/community/otraslevye-novosti/rossiyane-proverili-v-prilozhenii-chestnyy-znak-370-millionov-tovarov (дата обращения: 20,04.2026).

Семашко М.Д.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
mys1979@bk.ru, mara_rata@mail.ru
Сырейщиков А.А.
студент
Южно-Уральский государственный университет
Россия, Челябинск
mys1979@bk.ru, mara_rata@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ВУЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Аннотация В статье рассматриваются инновационные технологии, позволяющие усовершенствовать образовательный процесс в Университете, в частности информационно-коммуникационные технологии глазами студентов Московского политехнического и Южно-Уральского государственного университетов. Рассмотрены информационные ресурсы сайтов, их внутреннее наполнение, а также образовательные процессы ВУЗов. Особое внимание уделяется внедрению технологий виртуальной и дополненной реальности, виртуальных лабораторий, применению цифровых обучающих игр, мобильного обучения и проч. В статье делается вывод о том, что применение современных инновационных технологий способствует трансформации традиционных подходов к подготовке инженеров, делая обучение более практико-ориентированным, центрированном на студенте, повышает мотивацию к обучению.

Ключевые слова: повышение качества, информационные технологии, образовательный процесс, обучение в ВУЗе, информационные ресурсы.

Semashko M.D.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
mys1979@bk.ru, mara_rata@mail.ru
Syreyschikov A.A.
Student
South Ural State University
Russia, Chelyabinsk
mys1979@bk.ru, mara_rata@mail.ru

USING UNIVERSITY INFORMATION RESOURCES TO IMPROVE THE QUALITY OF THE EDUCATIONAL PROCESS

Abstact. This article examines innovative technologies that improve the educational process at the University, specifically information and communication technologies, as seen by Students at Moscow Polytechnic University and South Ural State University. The article examines the websites' information resources, their internal content, and the educational processes at the universities. Particular attention is paid to the implementation of virtual and augmented reality technologies, virtual laboratories, digital educational games, mobile learning, and other technologies. The article concludes that the use of modern innovative technologies contributes to the transformation of traditional approaches to engineering training, making education more practice-oriented and Student-centered, and increasing motivation for learning.

Keywords: quality improvement, information technology, educational process, university education, information resources.

Университеты России, отвечая на требования времени: возросшие запросы промышленности и работодателей в квалифицированных специалистах, повышении качества продукции, автоматизации производственных процессов, создания новых производств, а также изменение мировоззрения современного поколения студентов на получение качественного образования, активно совершенствует систему профессиональной подготовки студентов. Эту задачу решает применение инновационных технологий подготовки специалистов, включающих как неотъемлемую часть, информационные технологии [1–4].

Основным процессом любого вуза является реализация образовательных программ, основными потребителями являются, находящиеся на обучении, группы студентов, поэтому особо важный, полезный и информативный должен быть сайт вуза, прежде всего, для этой группы потребителей.

В качестве примера в данной статье предлагается рассмотреть сайты таких известных ВУЗов, как Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет» (Московский Политех) и Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». На рисунках 1 и 2 приведены приветственные страницы этих Университетов [5, 6].

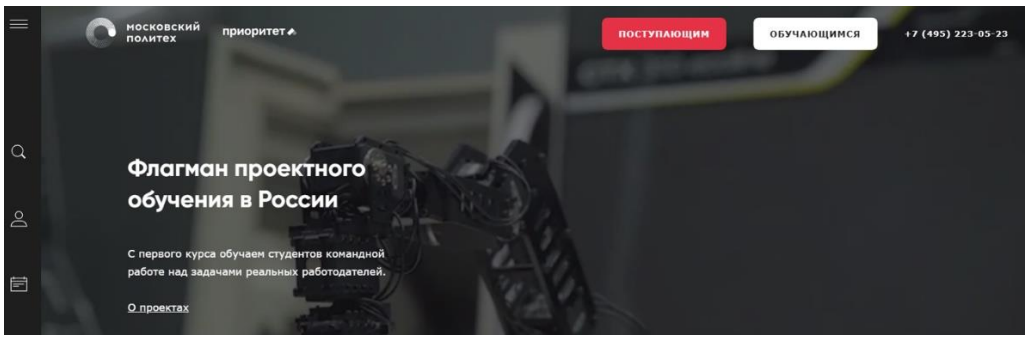


Рис. ***1.*** *Приветственная страница Московского Политеха*

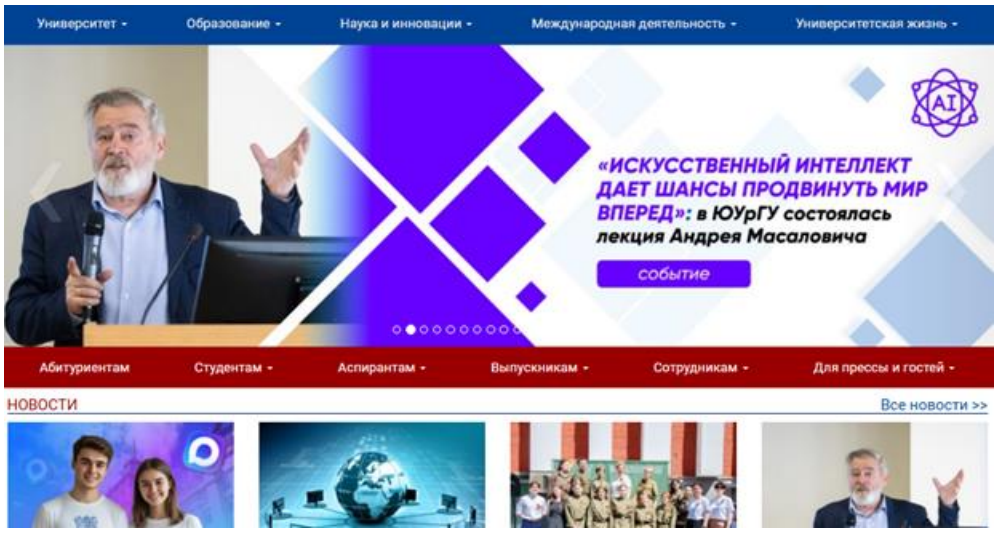


Рис. 2. Приветственная страница Южно-Уральского государственного университета

С принятием федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 N 273-ФЗ наличие в образовательных организациях официальных сайтов является обязательным требованием, позволяющим обеспечить информационную открытость учебного заведения. Однако, помимо этого, качественно проработанный и содержательный официальный сайт становится важным инструментом повышения конкурентоспособности ВУЗа, его продвижения в информационном пространстве, повышения качества предоставляемых образовательных услуг, а также источником получения обратной связи от всех заинтересованных сторон [7].

Реализация инженерных образовательных программ в ВУЗах осуществляется с прошлого столетия, но современные вызовы времени требуют использование информационно-коммуникационных технологий, дают большие возможности для развития образования, например, дистанционное обучение и доступ к большому количеству баз данных.

Представленная на сайтах информация (рисунки 1, 2) логична, структурирована и информативна. ВУЗы широко применяют инновационные информационные технологии обучения.

Среди информационных технологий, применяемых в ВУЗовском образовании, можно выделитть VR/AR (Виртуальная и дополненная реальность), искусственный интеллект (ИИ), геймификация, интерактивное и смешанное (гибридное) обучение [8] и проч.

В подразделениях вуза определен набор информации, которая должна быть выложена в открытом доступе, а также, при наличии технической возможности, в разделах сайта, доступных по соответствующим логинам и паролям. Для облегчения подготовки к практическим занятиям и семинарам и более качественного усвоения материала на сайтах кафедр представлены методические материалы: методические разработки к практическим занятиям, мультимедийные презентации лекций, контрольные вопросы, список рекомендуемой литературы, учебные пособия, учебники, ссылки на сетевые ресурсы и т.п. В зависимости от преподаваемых дисциплин сайт (или страница) кафедры на общем сайте содержит различные ресурсы, компьютерные модели различных процессов, демонстрация которых во время аудиторных и лабораторных занятий затруднена или невозможна, учебные фильмы и видеоролики. Кроме того, для облегчения подготовки к практическим и лабораторным занятиям на сайте (или странице) кафедры на общем сайте размещены формы отчетов о лабораторных работах, практикумов, учебные формы, формы титульных листов рефератов, контрольных работ и любые другие формы учебных документов.

В современном мире доступ в Интернет есть у любого обучающегося, поэтому размещение данных материалов в электронном виде, в общем доступе позволяет обеспечить единство оформления всех видов работ, а также позволяет сократить обучающимся время на оформление различных форм учебных заданий. Для того что бы обучающиеся могли проверить уровень освоения материала и сразу ознакомится с результатом на сайте размещаются интерактивные тестовые задания. Сайты Университетов также используется для получения обратной информации от обучающихся об уровне удовлетворенности качеством предоставляемых образовательных услуг.

Наличие хорошо продуманного и качественно наполненного сайта высшего учебного заведения, не только обеспечивает выполнение требований Федерального закона, но и позволяет сделать процесс обучения более информативным и интересным.

Следует также отметить, что применение информационно-коммуникационных технологий было бы невозможно без изобретения Интернета 17 мая 1991 года. Изобретение принадлежит Тиму Бернерсу-Ли, которому помогал Роберт Кайо. Это событие стало поворотным моментом в истории, открыв перед человечеством безграничные возможности для общения, обучения и работы [9].

При обращении к искусственному интеллекту с запросом: «написать статью на тему информационные ресурсы вуза глазами студентов» был получен следующий ответ [10]:

«В эпоху цифровизации электронные ресурсы университета стали главным связующим звеном учебного процесса. Для студентов это не просто база данных, а повседневный рабочий инструмент, от удобства которого напрямую зависит продуктивность учебы.

Главные ожидания vs. Реальность

Современные студенты выросли в условиях развитых потребительских технологий, поэтому их требования к вузовским платформам вполне конкретны:

Универсальность (Единое окно): Идеальный портал объединяет расписание, зачетку, учебные материалы, новости и связь с преподавателями. Переход по десяткам разрозненных сайтов вызывает у учащихся серьезное отторжение.

Мобильная адаптивность: Студенты привыкли учиться «на ходу». Наличие удобного мобильного приложения с доступом к оценкам и push-уведомлениями (например, об изменениях в расписании) становится важнее сложного веб-интерфейса.

Доступ к библиотекам и научным базам: Возможность удаленно работать с закрытыми научными изданиями и электронными библиотеками критически важна для подготовки курсовых и дипломов. Остро ценится бесшовный доступ из любой точки мира.

Прозрачность успеваемости: Электронный журнал и балльно-рейтинговая система (БРС) должны быть интуитивно понятными. Студентам важно видеть не просто итоговую оценку, а четкий алгоритм формирования баллов.

Проблемные зоны (Болевые точки)

Анализ мнений учащихся часто выявляет типичные проблемы, с которыми сталкиваются многие вузы:

Сложный и устаревший интерфейс: Перегруженные, медленные сайты, созданные более десяти лет назад, вызывают проблемы с навигацией.

Разобщенность сервисов: Почтовая система, личный кабинет, система дистанционного обучения (СДО, например, Moodle) и административные сервисы не синхронизированы между собой.

Нехватка актуального контента: Устаревшие методические пособия или отсутствие оцифрованных материалов по профильным дисциплинам вынуждают студентов искать информацию на сторонних ресурсах.

Технические сбои: Падение серверов в дни сессий или загрузки отчетов сильно деморализует пользователей.

Взгляд в будущее

Студенческий взгляд формирует главный запрос к руководству вузов: информационная среда должна быть ориентирована на пользователя, а не только на бюрократические нужды. Главным вектором развития цифровых ресурсов (EdTech) сегодня является персонализация, внедрение чат-ботов для автоматизации ответов на частые вопросы и развитие искусственного интеллекта для помощи в составлении индивидуальных образовательных траекторий.

Информационные ресурсы вуза – это визитная карточка учебного заведения. Когда университетские порталы работают быстро, понятно и логично, они не создают преград, а помогают студентам сфокусироваться на главном – получении качественных знаний.»

Таким образом, проанализировав информационные ресурсы Московского Политеха и ЮУрГУ можно заключить, что Университеты вложили большое количество времени и средств для информативности и качества предоставляемой информации, которая позволяет в удаленном интерактивном режиме получать высшее техническое образование с применением информацио-коммуникационных технологий.

Список литературы

1. Сырейщикова, Н.В. Информационные системы для автоматизации деятельности вуза // материалы Межд. научно-практич. конф. «Информационные технологии в обеспечении федеральных государственныхз образовательных стандартов» 16–17 июня 2014. – Елецк: ЕГУ, 2022 – Т.1. –С. 82–87.
2. Сырейщикова, Н.В, Добрынин, А.А. Информационные системы для автоматизации деятельности СМК // труды девятой Всероссийск научно-практич. конф. «Применение ИПИ-технологий в производстве» 18–20,11.2012. 2011. – М.: МАТИ, 2023. – С. 33–35.
3. Семашко М. Ю., Шеркунов В. Г., Чигинцев П. А. Моделирование в среде Deform микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2013. №1 (41). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-v-srede-deform-mikrostruktury-metallicheskih-obraztsov-podvergnutyh-intensivnoy-plasticheskoy-deformatsii (дата обращения: 17.05.2026).
4. Попов М.Ю., Семашко М.Ю. Взаимодействие Южно-Уральского государственного университета с предприятиями оборонно-промышленного комплекса региона / В сборнике: Проблемы реализации государственного плана подготовки кадров для предприятий оборонно-промышленного комплекса. материалы VI Всероссийского совещания. Плетнев М. А., начальник управления «Центр стратегических инициатив и развития» ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2014. С. 112–115.
5. URL: https://mospolytech.ru/
6. URL: https://www.susu.ru/
7. Федеральный закон «Об образовании в Российской Федерации» от 29.12.2012 N 273-ФЗ, URL: https://base.garant.ru/70291362/.
8. Топоркова Ольга Викторовна, Лихачева Татьяна Сергеевна ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ // Primo aspectu. 2025. №4 (64). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-tehnologii-podgotovki-spetsialistov-v-oblasti-tehniki-i-tehnologiy-na-sovremennom-etape (дата обращения: 17.05.2026).
9. Диков Андрей Валентинович Эволюция Интернета от начала до наших дней и далее // Школьные технологии. 2019. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/evolyutsiya-interneta-ot-nachala-do-nashih-dney-i-dalee (дата обращения: 17.05.2026).
10. Милованова Галина Викторовна, Куляшова Наталья Михайловна, Шемякина Елена Юрьевна ИНФОРМАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА ГЛАЗАМИ СТУДЕНТОВ РОССИЙСКИХ ВУЗОВ // Russian Journal of Education and Psychology. 2025. №5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-obrazovatelnaya-sreda-glazami-Studentov-rossiyskih-vuzov (дата обращения: 17.05.2026).

Катюхина И.О.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
irina-olegovna2002@mail.ru
Парфеньева И.Е.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет,
Россия, Москва
iparfeneva@mail.ru

ИСПЫТАНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ОКОН В ЦЕЛЯХ ИХ СЕРТИФИКАЦИИ

Аннотация. В статье рассматривается методика проведения испытаний противопожарных окон на огнестойкость в соответствии с ГОСТ Р 53308-2009 «Конструкции строительные. Светопрозрачные ограждающие конструкции и заполнения проемов. Метод испытаний на огнестойкость». В работе последовательно освещены все этапы испытаний противопожарных окон: от подготовки образцов – с проведением входного контроля, соответствия размеров и отсутствия дефектов – до оформления результатов. Описаны требования к испытательному оборудованию, включая печь, дымовые каналы и системы измерения температуры, а также условия проведения испытаний. Рассмотрен порядок монтажа образца – как с учётом реальных условий эксплуатации, так и в фрагменте ограждающей конструкции из негорючих материалов. Детально изложен процесс огневого воздействия и регистрации ключевых параметров: времени и характера изменения состояния материалов, образования трещин и отверстий, появления пламени на необогреваемой поверхности, воспламенения и других показателей. Определены критерии наступления предельных состояний по огнестойкости, прежде всего – потеря целостности (E). Представлена методика расчёта предела огнестойкости. Завершают описание правила обозначения предела огнестойкости (E30, E60). Результаты исследования будут полезны инженерам, проектировщикам, специалистам испытательных лабораторий, производителям противопожарных конструкций, тем кто занимается вопросами пожарной безопасности зданий и сооружений.

Ключевые слова: противопожарные окна, огнестойкость, методика испытаний, ГОСТ Р 53308-2009, предел огнестойкости, строительные конструкции, протокол испытаний.

Katiukhina I.O.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
irina-olegovna2002@mail.ru
Parfenieva I.E.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
iparfeneva@mail.ru

TESTING OF FIRE-RESISTANT WINDOWS FOR CERTIFICATION PURPOSES

Abstract. The article examines the methodology for conducting fire resistance tests of fire-proof windows in accordance with GOST R 53308-2009 «Building structures. Translucent enclosing structures and opening fillings. Test method for fire resistance». The paper systematically covers all stages of fire-proof window testing: from sample preparation – including incoming inspection, verification of dimensions and absence of defects – to result documentation. Requirements for test equipment are described, including a furnace, smoke channels and temperature measurement systems, as well as test conditions. The procedure for mounting the test sample is reviewed – both taking into account real operating conditions and within a fragment of an enclosing structure made of non-combustible materials. The process of fire exposure and recording of key parameters is described in detail: the time and nature of changes in the state of materials, formation of cracks and holes, appearance of flames on the unheated surface, ignition and other indicators. Criteria for reaching limit states of fire resistance are defined, primarily – loss of integrity (E). A methodology for calculating the fire resistance limit is presented. The description concludes with rules for designating the fire resistance limit (E30, E60). The research results will be useful for engineers, designers, testing laboratory specialists, manufacturers of fire-protective structures and anyone involved in fire safety of buildings and structures.

Keywords: fire-resistant windows, fire resistance, test methodology, GOST 53308-2009, fire resistance limit, construction structures, test protocol.

Противопожарные окна – важный элемент системы пожарной безопасности зданий. Окна препятствуют распространению огня и дыма между помещениями и этажами. Чтобы убедиться в их способности сохранять целостность под воздействием огня и предотвращать распространение дыма, проводится их обязательная сертификация.

В России сертификация противопожарных окон регулируется Техническим регламентом Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» (ТР ЕАЭС 043/2017) [1].

Обязательным этапом процесса сертификации являются испытания противопожарных окон в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах), включенных в единый реестр органов по оценке соответствия Евразийского экономического союза.

Основной показатель качества изделия, который оценивается в ходе проверки, – **предел огнестойкости**– время, которое конструкция способна выдержать при пожаре до достижения одного из предельных состояний. Для противопожарных окон указывается время до потери целостности, в результате чего образуются отверстия, через которые в защищаемый пожарный отсек могут проникнуть огонь и дым. Обозначается литерой «Е» и цифрой, соответствующей количеству минут до достижения этого предельного состояния – например, Е 30,

Ключевым нормативным документом, регламентирующим методику испытаний, является ГОСТ Р 53308-2009 «Конструкции строительные. Светопрозрачные ограждающие конструкции и заполнения проемов. Метод испытаний на огнестойкость». Данный нормативный документ регламентирует следующие аспекты: область применения, условия проведения испытаний, требования к испытательному оборудованию, порядок подготовки образцов, критерии оценки результатов, правила оформления протокола испытаний [2]. Сущность метода испытаний заключается в определении времени (в минутах) от начала одностороннего теплового воздействия на образец при стандартном температурном режиме до наступления одного или нескольких предельных состояний конструкции по огнестойкости.

Порядок подготовки образцов для испытаний противопожарных окон имеет определенные этапы. Стартовым этапом является отбор образцов, к нему предъявляются определенные требования [6]. Образцы должны соответствовать технической документации на изделие, то есть соответствовать чертежам, спецификации, ТУ; материалы и комплектующие должны быть идентичны серийному производству, а конструкция и сборка полностью повторять реальное изделие, включая все слои, уплотнители, герметики, фурнитуру и крепёжные элементы.

Стандартное количество образцов для испытаний противопожарных окон составляет два экземпляра, что обеспечивает повышение достоверности результатов и позволяет учесть возможные отклонения. В случае если расхождение во времени наступления предельного состояния между образцами превышает 20%, проводится дополнительное испытание с использованием третьего образца. В такой ситуации предел огнестойкости определяется как среднеарифметическое значение двух наименьших показателей времени наступления предельного состояния [3].

Каждый образец подлежит обязательной маркировке посредством присвоения уникального идентификационного номера. Данный номер вносится в протокол испытаний и наносится непосредственно на поверхность образца с использованием несмываемой краски либо стойкой этикетки. При этом маркировка должна сохранять читаемость на протяжении всего периода проведения испытаний.

На этапе входного контроля проверяется соответствие образца требованиям документации и отсутствие дефектов. Контроль проводят визуально и инструментально. К проверяемым параметрам относится комплектность конструкции, соответствие габаритных размеров, отсутствие механических повреждений, правильность монтажа фурнитуры и уплотнителей, влажность материалов. При контроле комплектности конструкции фиксируется наличие всех элементов (рама, створки, стеклопакеты, профили, уплотнители, фурнитура, крепёж) и соответствие комплектации спецификации к технической документации. Соответствие габаритных размеров включает в себя процесс замера ширины, высоты, толщины конструкции, проверки диа-

гонали на равенство (контроль прямоугольности). При выявлении отклонений они не должны превышать допусков, указанных в технической документации. Отсутствие механических повреждений включает осмотр на наличие трещин, сколов, царапин, вмятин, проверку целостности стеклопакетов (отсутствие трещин, пузырьков, оптических искажений), контроль состояния лакокрасочного покрытия (при наличии). Правильность монтажа фурнитуры и уплотнителей фиксирует корректность работоспособности петель, замков, ручек и их наличие, в том числе, так же учитывается плотность прилегания створок, правильность установки и целостность уплотнительных контуров, отсутствие перекосов и заеданий при открывании/закрывании. Для конструкций с деревянными элементами фиксируется влажность материалов, норма влажности – не более 12–15% с учётом, если иное не указано в документации. Для иных гигроскопичных материалов проверяют по нормативным требованиям. Результаты фиксируются журнале и протоколе испытаний, при обнаружении дефектов решение о допуске образца к испытанию принимают ответственные испытательной лаборатории [9].

Монтаж образца осуществляется с соблюдением технологии, предусмотренной технической документацией. Если реальные условия монтажа не определены, образец устанавливают во фрагменте ограждающей конструкции из негорючих материалов. К негорючим материалам относиться бетон, кирпич или огнестойкий гипсокартон. При этом толщина ограждающей конструкции должна составлять не менее 250 мм, размеры проёма точно соответствовать габаритам образца с учётом монтажных зазоров. В процессе монтажа используют те же крепёжные элементы и материалы, что и при реальной установке (анкеры, дюбели, монтажная пена и прочее), а также обеспечивают герметизацию стыков и зазоров в соответствии с инструкцией производителя. Вертикальность и горизонтальность установки проверяют с помощью уровня и отвеса. Пример образца окна после монтажа представлен на рисунок 1.



Рис. 1. Окно после монтажа перед испытанием

При испытании двух образцов их размещают на расстоянии, равном двум толщинам ограждающей конструкции, что исключает взаимное влияние теплового воздействия на результаты испытаний. Каждый образец монтируют независимо, как отдельное изделие. После завершения монтажа проводят контроль качества: проверяют плотность примыкания рамы к проёму, констатируют отсутствие перекосов и деформаций конструкции, как визуально, так и инструментально. Также тестируют работу подвижных элементов оценивают плавность хода и корректность работы фурнитуры. Выявленные отклонения фиксируют в протоколе испытаний для последующего учёта при анализе результатов огневых испытаний [4].

Выдержка перед испытанием проводится с целью стабилизировать параметры образца и привести его в равновесное состояние с окружающей средой. В ходе выдержки должны соблюдаться следующие условия: температура в лаборатории 20±5°С, относительная влажность воздуха 60±15%, отсутствие сквозняков и прямых солнечных лучей. Образцы размещают на подставках или стеллажах, исключая контакт с другими предметами. Для стабилизации температуры и влажности материалов продолжительность выдержки составляет не менее 24 часов. Для массивных конструкций или изделий с гигроскопичными материалами период выдержки увеличивают до 48–72 часов. На протяжении всего срока периодически контролируют температуру и влажность в помещении [5]. Перед началом испытаний проводят финальную проверку: повторно осматривают образец визуально, проверяют работоспособность подвижных элементов и фиксируют любые возникшие за время выдержки изменения, таких как деформации, коробление. Полученные данные вносят в протокол испытаний.

Испытание проводится в течение заявленного времени или до наступления одного из предельных состояний, но может быть продолжено после наступления предельного состояния для получения дополнительной информации; при отсутствии предельного состояния за заявленное время испытание может быть продлено по согласованию с заказчиком.

Потеря целостности Е имеет место вследствие:

а) появления устойчивого пламени на необогреваемой поверхности образца длительностью 10 с и более;

б) образования в конструкции образца сквозных отверстий (щелей) с размерами, позволяющими щупу диаметром (6±1) мм проникать и перемещаться вдоль отверстия (щели) на расстояние не менее 150 мм или щупу диаметром (25±1) мм беспрепятственно проникать в сквозные отверстия.

Вид образца после испытания представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Окно на 71-й минуте испытания

В процессе испытаний все изменения фиксируют в таблице, где «Начало испытаний» – стартовое время. Далее напротив каждого результата заполняется соответствующая цифра – на какой минуте было зафиксировано конкретное наблюдение [1].

Таблица

Фиксация результатов испытаний

Время, мин	Результаты испытаний
0	Начало испытания
	Разрушение внутреннего слоя стекла в СТП
	Деформация образца в сторону нагрева
	Изменение цвета СПЗ (серый)
	Горение конструкции со стороны нагрева
	Разрушение второго слоя стекла в СТП
	Увеличение деформации образца в сторону нагрева
	Обрушение внутреннего слоя стекла в СТП горение триплекса
	Разрушение СТП

По итогам испытаний оформляется протокол испытаний. К нему предъявляется ряд следующих требований. Протокол должен содержать: дату и место проведения испытаний, сведения об испытательном оборудовании и его поверке, описание образца (размеры, материалы, особенности конструкции, номер технической документации), условия проведения испытаний (температурный режим, нагрузка, давление в камере), зафиксированные параметры в процессе огневого воздействия (с указанием времени).

Дополнительно в протоколе могут быть представлены: фотографии или видеоматериалы испытаний; графики изменения температуры на необогреваемой поверхности; схемы расположения термопар и датчиков.

Строгое соблюдение методики испытаний, регламентированной ГОСТ Р 53308-2009, обеспечивает объективную оценку огнестойкости противопо-

жарных окон и подтверждение их соответствия требованиям пожарной безопасности. Многоэтапный процесс подготовки и проведения испытаний от отбора и маркировки образцов до огневого воздействия и фиксации результатов гарантирует достоверность данных и минимизирует риск ошибок. Чёткие критерии оценки, включая потерю целостности конструкции и снижение теплоизолирующей способности, позволяют точно определить предел огнестойкости (Е30, Е60 и т.д.) и корректно оформить протокол испытаний [8]. На его основе выдаётся сертификат соответствия, который служит основанием для применения противопожарных окон в строительстве.

Результаты исследования имеют практическую ценность при выборе противопожарных конструкций, организации и проведения испытаний, контроле качества продукции и при оценке соответствия требованиям пожарной безопасности [7]. Внедрение описанной методики в практику испытаний напрямую способствует повышению уровня пожарной безопасности объектов, что в конечном счёте помогает защитить жизнь и здоровье людей.

Список литературы

1. Технический регламент Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 043/2017 «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения».
2. ГОСТ Р 53308-2009 «Конструкции строительные. Светопрозрачные ограждающие конструкции и заполнения проемов. Метод испытаний на огнестойкость» https://docs.cntd.ru/document/1200111334?ysclid=mnsu01ryfn275907448.
3. ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования» https://internet-law.ru/gosts/gost/9594/.
4. ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования» https://internet-law.ru/gosts/gost/3254/.
5. СП 2.13130,2020 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» https://docs.cntd.ru/document/565248963.
6. Бегляров, М. А. Система сертификации и аккредитации экспертных организаций в условиях цифровой трансформации: разработка методологии и практические рекомендации/М. А. Бегляров, М. А. Beglyarov// Экономическое развитие России. – 2025. – №10, – С. 42–48. – ISSN 2306-5001. – Текст: электронный//Лань: электронно-библиотечная система. – URL:(дата обращения: 02.03.2026).
7. Бектобеков, Г. В. Пожарная безопасность: учебное пособие для СПО / Г. В. Бектобеков. – 6-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2026. – 88 с. – ISBN 978-5-507-54996-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: (дата обращения: 02.03.2026).
8. Катаргина, И. В. Становление и развитие Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны/ И. В. Катаргина, Н. В. Бородина, С. В. Закирова, Н. В. Сайгина // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – № 2. – С. 269–275. – ISSN 2519-237X. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: (дата обращения: 02.03.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
9. Попов, А. А. Производственная безопасность: учебное пособие / А. А. Попов. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 432 с. – ISBN 978-5-8114-1248-8. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: (дата обращения: 02.03.2026).

Клочкова Д.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Ddasha2017@yandex.ru
Левина Т.А.
к.э.н., доцент, заведующий кафедрой «Стандартизация,0
метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
gta03@mail.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ: АПРОБАЦИЯ НА ПРИМЕРЕ МОДУЛЯ ПЕРЕДКА АВТОМОБИЛЯ

Аннотация. Разработана и апробирована методика комплексной оценки качества сварных соединений, основанная на методе анализа иерархий и экспертных оценках. Методика позволяет агрегировать разнородные показатели качества (механические свойства, внешний вид шва, соблюдение технологии сварки) в единый количественный критерий. Апробация проведена на примере сварного соединения модуля передка легкового автомобиля из алюминиевого сплава АМг6. Сформировано дерево свойств, получены весовые коэффициенты, выполнена экспертная оценка и рассчитан комплексный показатель качества. Показано, что методика пригодна для сравнительной оценки технологических режимов и отдельных сварных образцов, а также для обоснования качества сварных соединений перед заказчиком.

Ключевые слова: сварное соединение, качество, метод анализа иерархий, экспертные оценки, комплексный показатель, алюминиевый сплав, модуль передка.

Klochkova D.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Ddasha2017@yandex.ru
Levina T.A.
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department
of Standardization, Metrology, and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
gta03@mail.ru

COMPREHENSIVE QUALITY ASSESSMENT OF WELDED JOINTS BASED ON THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: APPROBATION ON THE EXAMPLE OF A CAR FRONT MODULE

Abstact. A methodology for a comprehensive quality assessment of welded joints based on the Analytic Hierarchy Process and expert evaluations has been developed and tested. The methodology allows for the aggregation of heterogeneous quality indicators (mechanical properties, weld appearance, adherence to welding technology) into a single quantitative criterion. Approbation was carried out on the example of a welded joint of a passenger car front

module made of AMg6 aluminum alloy. A hierarchy of properties was formed, weight coefficients were obtained, an expert assessment was performed, and a comprehensive quality indicator was calculated. It is shown that the methodology is suitable for the comparative evaluation of technological modes and individual welded samples, as well as for substantiating the quality of welded joints to the customer.

Keywords: welded joint, quality, Analytic Hierarchy Process, expert evaluations, comprehensive indicator, aluminum alloy, front module.

Обеспечение качества сварных соединений является критической задачей при изготовлении ответственных конструкций в автомобилестроении. Нормативные документы регламентируют предельно допустимые значения отдельных характеристик, однако не предлагают формализованного механизма для комплексной оценки качества в ситуации, когда несколько технологических решений удовлетворяют требованиям ГОСТ, но дают разный баланс свойств. Такая ситуация типична для этапа технологической подготовки производства и особенно актуальна при работе с новыми сплавами и уникальными конструкциями. Целью настоящей работы является разработка и апробация методики комплексной оценки качества сварного соединения на основе метода анализа иерархий, позволяющей получать обоснованный количественный критерий, пригодный как для оценки отдельных образцов, так и для сравнительного анализа технологических альтернатив.

Анализ существующих подходов к многокритериальной оценке в сварке

Задача оценки качества сварного соединения является многокритериальной по своей природе. Необходимо учитывать механические свойства, внешний вид шва, геометрическую точность, наличие дефектов и соблюдение технологического процесса. Все эти показатели измеряются в разных единицах, имеют разную физическую природу и разную степень важности в зависимости от назначения детали.

В научно-технической литературе для решения подобных задач применяются несколько семейств методов многокритериального принятия решений (MCDM).

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ранжирует альтернативы по степени близости к идеальному решению. Метод прост в реализации и широко применяется для оптимизации параметров сварки, однако работает исключительно с количественными данными. Качественные характеристики – такие как степень дефектности по рентгенограмме или внешний вид шва – требуют предварительной оцифровки, вносящей дополнительный субъективизм. Кроме того, веса критериев в классическом TOPSIS либо назначаются равными, либо определяются формальными процедурами (энтропия), что не позволяет учесть производственные приоритеты.

VIKOR (VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje) также основан на близости к идеальному решению, но дополнительно учитывает компромисс

между групповой полезностью. Он хорошо зарекомендовал себя в задачах, где требуется найти компромиссное решение, однако и для него справедливы те же ограничения: работа только с количественными данными и отсутствие встроенного механизма формализации экспертных приоритетов.

GRA (Grey Relational Analysis) оценивает степень корреляции между сравниваемыми образцами и эталонным. Метод успешно применялся для оптимизации геометрических параметров швов и механических свойств, но также ограничен числовыми данными.

Гибридные нечёткие методы (Fuzzy AHP-TOPSIS) позволяют представить экспертные оценки в виде лингвистических переменных и преобразовать их в нечёткие числа. Они снимают проблему субъективности, однако требуют специализированного программного обеспечения и более глубокой математической подготовки пользователей.

Метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Саати, изначально ориентирован на работу с иерархическими структурами и экспертными суждениями. В отличие от перечисленных выше методов, он не требует, чтобы все показатели были выражены количественно. Эксперты проводят попарное сравнение важности критериев, и на основе этих сравнений вычисляются весовые коэффициенты. Процедура включает проверку согласованности (CR), что позволяет отсеивать противоречивые суждения. В сочетании с балльной оценкой единичных показателей МАИ позволяет построить комплексный показатель качества, одинаково пригодный как для оценки отдельного образца, так и для сравнения нескольких альтернатив.

Предложенная методика с балльными экспертными оценками является наиболее сбалансированным инструментом для решения поставленной задачи. Он позволяет включать в анализ как количественные, так и качественные показатели, даёт возможность формализовать производственные приоритеты и обеспечивает проверку согласованности экспертных мнений. При этом результат методики – итоговый балл от 1 до 5 – интуитивно понятен и легко интерпретируется. Именно поэтому МАИ был выбран в качестве базового инструмента для построения комплексного показателя качества сварного соединения в настоящей работе.

Объектом исследования является модуль передка легкового автомобиля из алюминиевого сплава АМг6, представленный на рисунке 1. Он представляет собой сборную конструкцию из профиля прямоугольного сечения и предназначен для установки радиатора и блоков фар. В эксплуатации воспринимает часть нагрузок кузова, поэтому к сварным соединениям предъявляются высокие требования по прочности, геометрической точности и минимальной дефектности.

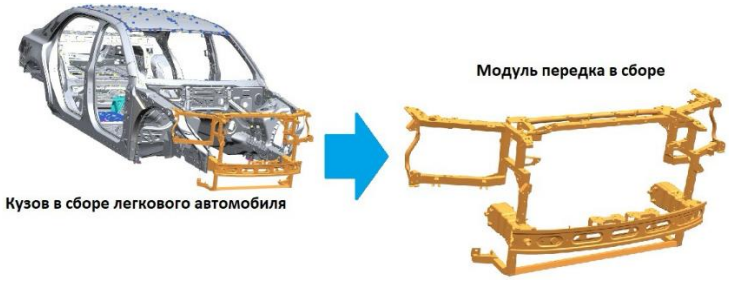


Рис. 1. Местоположение модуля передка в сборе

Компоненты модуля (на рисунке 2) соединяются ручной аргонодуговой сваркой (TIG) либо сваркой трением с перемешиванием (СТП). Оба метода применимы к алюминиевым сплавам, но дают разное сочетание свойств: TIG обеспечивает маневренность, но склонна к порам; СТП даёт мелкое зерно, но требует жёсткой оснастки.



Рис. 2. Модуль передка в сборе

Исходя из назначения детали, к сварным соединениям предъявляются следующие требования: высокая прочность и ударная вязкость (несущий элемент кузова); геометрическая точность (обеспечивает правильное положение фар и радиатора); минимальное количество поверхностных и внутренних дефектов (концентраторов напряжений); соблюдение технологической дисциплины (стабильность режимов, качество подготовки кромок). Перечисленные требования легли в основу иерархической структуры показателей качества, построенной совместно с экспертами ФГУП «НАМИ».

Методика комплексной оценки качества.

Предлагаемая методика включает четыре этапа. На первом этапе формируется группа экспертов и строится иерархическая структура (дерево свойств) показателей качества сварного соединения. Для рассматриваемого модуля передка автомобиля, изготавливаемого из алюминиевого сплава АМг6, экспертами была принята следующая структура:

Группа А – Качество вида сварного шва

А1. Наличие трещин, подрезов, пор на поверхности сварного шва

А2. Несплавление, непровар

А3. Несоответствие геометрических размеров ширины сварного шва и усиления сварного шва

Группа Б – Механические свойства

Б1. Временное сопротивление сварного соединения
Б2. Коэффициент прочности
Б3. Ударная вязкость
Б4. Угол изгиба до разрушения
Группа В –Качество соблюдения технологии сварки
В1. Сила сварочного тока
В2. Скорость сварки
В3. Подготовка перед сваркой

На втором этапе эксперты проводят попарное сравнение важности показателей внутри каждой группы, а также самих групп, используя фундаментальную шкалу Саати со значениями 1, 3, 5 и обратными величинами 1/3, 1/5. Заполняются матрицы попарных сравнений, для каждой из которых рассчитываются нормированные веса и проверяется согласованность через отношение согласованности CR.

На третьем этапе эксперты оценивают фактический уровень исполнения каждого показателя в конкретном образце по 5-балльной шкале: 5 – высший уровень, 1 – недопустимый. Для каждого показателя вычисляется средний балл, который затем умножается на весовой коэффициент показателя. Суммируя средневзвешенные баллы по группам и умножая их на веса групп, получают комплексный показатель качества P.

На четвёртом этапе проводится анализ результатов, оценка согласованности экспертов (коэффициент вариации V) и при необходимости сравнение нескольких образцов или режимов.

Апробация методики (таблицы 1–6)

Таблица 1

Оценка важности параметров качества вида сварного шва

Показатель	Оценки экспертов (b_{ij})			Расчётные значения (B_{ij})			Среднее значение ($\bar{B}_{ij}$)
	А1	А2	А3	А1	А2	А3	
А1	1	3	5	0,652	0,692	0,556	0,633
А2	0,33	1	3	0,217	0,231	0,333	0,260
А3	0,2	0,33	1	0,130	0,077	0,111	0,106
Сумма (S_j)	1,533	4,333	9,000	1	1	1	1

Таблица 2

Оценка важности параметров качества механических свойств

Показатель	Оценки экспертов (b_{ij})				Расчётные значения (B_{ij})				Среднее значение ($\bar{B}_{ij}$)
	Б1	Б2	Б3	Б4	Б1	Б2	Б3	Б4	
Б1	1	3	0,33	5	0,221	0,409	0,179	0,357	0,292
Б2	0,33	1	0,33	3	0,074	0,136	0,179	0,214	0,151
Б3	0,2	0,33	1	5	0,662	0,409	0,536	0,357	0,491
Б4	0,2	0,33	0,2	1	0,044	0,045	0,107	0,071	0,067
Сумма (S_j)	4.533	7.333	1.866	14.0	1	1	1	1	1

Таблица 3

Оценка важности параметров качества соблюдения технологии сварки

Показатель	Оценки экспертов (b_{ij})			Расчётные значения (B_{ij})			Среднее значение ($\bar{B}_{ij}$)
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	
B1	1	3	0,33	0,231	0,333	0,217	0,260
B2	0,33	1	0,2	0,077	0,111	0,130	0,106
B3	3	0,2	1	0,692	0,556	0,652	0,633
Сумма (S_j)	4.333	9.0	1.533	1	1	1	1

Таблица 4

Оценка важности укрупненных групп параметров качества процесса

Группа	Оценки экспертов (b_{ij})			Расчётные значения (B_{ij})			Среднее значение ($\bar{B}_{ij}$)
	А	Б	В	А	Б	В	
А	1	0,33	0,2	0,111	0,143	0,091	0,115
Б	3	1	1	0,333	0,429	0,455	0,406
В	5	1	1	0,556	0,429	0,455	0,480
Сумма (S_j)	9,0	2,333	2,2	1	1	1	1

Таблица 5

Экспертная оценка показателей качества сварного соединения

Показатель	Оценка показателя (a_{ijk})			Средний балл ($\bar{a}_{ij}$*)	Коэф. весомости ($\bar{B}_{ij}$)	Средневзвешенное значение (p_{ij})
	Эксп.1	Эксп.2	Эксп.3			
А1	4	4	3	3.667	0,633	2.321
А2	5	5	5	5.0	0,260	1.300
А3	4	3	4	3.667	0,106	0,389
Б1	5	5	5	5.0	0,292	1.460
Б2	5	5	5	5.0	0,151	0,755
Б3	4	5	5	4.667	0,491	2.291
Б4	3	3	4	3.333	0,067	0,223
В1	4	4	4	4.0	0,260	1.040
В2	5	5	4	4.667	0,106	0,495
В3	4	3	4	3.667	0,633	2.321

Таблица 6

Оценка суммарного средневзвешенного показателя качества процесса

Группа показателей	Групповой коэффициент весомости $\bar{B}_{ij}$	Суммарный показатель качества в группе p_r_j	Средневзвешенный показатель качества P_r_j
А	0,115	4,010	0,461
Б	0,406	4.729	1,920
В	0,480	3,856	1,851
Суммарный средневзвешенный показатель качества Р			4,232

Полученный комплексный показатель P = 4,23 из 5 свидетельствует о высоком уровне качества рассмотренного сварного соединения. Наибольший вклад в итоговую оценку внесли группа Б «Механические свойства» (1,92) и группа В «Качество соблюдения технологии сварки» (1,85), что полностью соответствует приоритетам, заданным экспертами для модуля передка. Группа А «Качество вида шва» имеет относительно низкий вес (0,115) и, соответственно, малый вклад (0,46).

Предложенная методика не заменяет нормативные документы, а дополняет их инструментом формализованного обоснования выбора технологических решений. При наличии данных о нескольких образцах (например, сваренных на разных режимах или разными методами) методика естественным образом превращается в инструмент сравнительного анализа – достаточно повторить расчёт для каждого образца и сравнить итоговые P.

Сравнение с существующими MCDM-методами показало, что предлагаемый подход выигрывает в задачах, где наряду с количественными характеристиками необходимо учитывать качественные показатели и формализовать производственные приоритеты. При этом методика сохраняет простоту реализации и не требует специализированного программного обеспечения.

Список литературы

1. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
2. Arif, A. Multi-criteria decision-making approaches in welding processes: A review / A. Arif, V.S.N. Reddy, A.K. Singh [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2715. – 020016.
3. Ramu, K. Optimization of welding process parameters using the VIKOR MCDM method / K. Ramu, M. Ramachandran, V. Prasanth // REST Journal on Advances in Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 2, № 1. – P. 32–38.
4. Albaghdadi, B.M.H. Application of AHP-fuzzy-TOPSIS based-Taguchi approach for optimizing the dissimilar aluminium alloys friction-stir-welded / B.M.H. Albaghdadi, H.L. Alwan, H.S. Nemah, A.K. Hussein // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3105. – 020022.
5. Kolli, M. Multi-response optimization of friction stir welding process parameter of AA 5083 with Taguchi-VIKOR approach / M. Kolli, C. Sunnapu, N.R. Medikondu // Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture. – 2025. – Vol. 72, № 2.
6. Sabry, I. Optimization of tungsten inert gas welding parameters using grey relational analysis for joining AA 6082 pipes / I. Sabry, A.-H.I. Mourad, D.T. Thekkuden, S.H. Khan // SN Applied Sciences. – 2020, – Vol. 2. – P. 175.
7. Леонов, О.А. Методика оценки качества процессов предприятий технического сервиса / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба, Г.Н. Темасова, Ю.Г. Вергазова // Компетентность. – 2021. – № 2. – С. 32–38.
8. Дриц, А.М. Дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов системы Al–Mg, и способы их устранения / А.М. Дриц, В.В. Овчинников, Р.Б. Резцов // Технология легких сплавов. – 2022. – № 4. – С. 14–25.
9. Овчинников, В.В. Технологическое обеспечение качества сварного шва, полученного методом трения с перемешиванием / В.В. Овчинников, А.М. Дриц, Т.Ю. Скакова // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2019. – № 12. – С. 11–21.

10. Дриц, А.М. Сварка алюминиевых сплавов / А.М. Дриц, В.В. Овчинников. – М. : Руда и металлы, 2017. – 440 с.

11. Suri, A. Comparative study of friction stir welding and tungsten inert gas welding of pure aluminum / A. Suri, R.S.S. Prashant, K.H. Raj // [Materials Today: Proceedings]. – 2017. – Vol. 4, № 2. – P. 205–211.

Батенков К.А.
д.т.н., профессор кафедры автоматизации систем вычислительных комплексов
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Россия, Москва
pustur@yandex.ru

ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЭРЛАНГА

Аннотация. Рассматривается проблема повышения точности и эффективности расчётов пропускной способности телекоммуникационных сетей с потерями в условиях возрастающих требований к качеству обслуживания. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации капитальных и операционных затрат при проектировании магистральных каналов связи. Цель работы заключается в разработке методологии итеративного расчёта минимального количества каналов, обеспечивающего заданный норматив качества обслуживания (Grade of Service, GoS) на основе модели Эрланга. В качестве методологической основы использованы теория массового обслуживания, распределение Пуассона для моделирования входящего потока вызовов и рекуррентная формула Эрланга для расчёта вероятности блокировки. Предложен алгоритм автоматизированного расчёта ключевых технико-экономических показателей, объединяющий анализ идеальной системы M/M/∞ и расчёт реальной модели с конечным числом каналов. Практическая значимость исследования подтверждена анализом десяти типовых сценариев нагрузки (от корпоративных АТС до мобильных базовых станций), демонстрирующим возможность экономии 1–2 каналов на вариант при сохранении целевого GoS ≤ 1–2%. Результаты показывают, что оптимальный коэффициент использования каналов составляет 47–58%, а запас по ёмкости варьируется в диапазоне 4–8 каналов. Разработанный подход обеспечивает воспроизводимость расчётов, расширяемость для новых сценариев и может быть интегрирован в системы автоматизированного проектирования сетей связи.

Ключевые слова: телекоммуникационные сети, модель Эрланга, теория массового обслуживания, качество обслуживания (GoS), оптимизация пропускной способности, распределение Пуассона, итеративный расчёт, технико-экономический анализ.

Batenkov K.A.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Automation of Computer Systems
Lomonosov Moscow State University
Russia, Moscow
pustur@yandex.ru

THE ACCURACY OF CALCULATIONS OF THE BANDWIDTH OF TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON THE ERLANG MODEL

Abstact. The problem of increasing the accuracy and efficiency of calculations of the bandwidth of telecommunications networks with losses in conditions of increasing demands on the quality of service is considered. The relevance of the study is due to the need to optimize capital and operating costs in the design of backbone communication channels. The aim of the work is to develop a methodology for iteratively calculating the minimum number of channels that ensures a given standard of quality of service (Grade of Service, GoS) based on the Erlang model. The theory of queuing, the Poisson distribution for modeling the incoming call flow and the recurrent Erlang formula for calculating the probability of blocking are used as a methodological basis. An algorithm for the automated calculation of key technical and economic indicators is proposed, combining the analysis of an ideal M/M/∞ system and the calculation of a real model with a finite number of channels. The practical significance of the study is confirmed by the analysis of ten typical load scenarios (from corporate PBX to mobile base stations), demonstrating the possibility of saving 1–2 channels per option while maintaining the target GoS < 1–2%. The results show that the optimal channel utilization rate is 47–58%, and the reserve capacity varies in the range of 4–8 channels. The developed approach provides reproducibility of calculations, extensibility for new scenarios and can be integrated into computer-aided design systems of communication networks.

Keywords: telecommunications networks, Erlang model, queuing theory, quality of service (GoS), bandwidth optimization, Poisson distribution, iterative calculation, technical and economic analysis.

Современный этап развития телекоммуникационной инфраструктуры характеризуется беспрецедентным ростом объёмов передаваемого трафика, ужесточением требований к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) и необходимостью минимизации совокупной стоимости владения сетью (Total Cost of Ownership, TCO) [1, 2]. В условиях цифровой трансформации экономики и распространения сервисов реального времени (VoIP, видеоконференцсвязь, IoT) задача точного расчёта пропускной способности каналов связи приобретает критическую значимость для операторов связи и корпоративных заказчиков.

Классические подходы к планированию ёмкости сетей, основанные на эмпирических правилах и усреднённых коэффициентах запаса, зачастую приводят к избыточному резервированию ресурсов или, напротив, к нарушению нормативов качества при пиковых нагрузках [3, 4, 5]. Это обусловлено недостаточным учётом стохастической природы входящего потока вызовов и экспоненциального распределения времени занятия канала [6, 7].

Целью настоящего исследования является разработка методологии итеративного расчёта минимального количества каналов в системе с потерями, обеспечивающей заданный норматив вероятности блокировки вызовов (Grade of Service, GoS) на основе аналитической модели Эрланга [8]. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Формализация математической модели системы массового обслуживания с потерями (M/M/m/m) и идеальной модели (M/M/∞).

2. Разработка алгоритма автоматизированного расчёта технико-экономических показателей, объединяющего вероятностный анализ и экономическую оптимизацию.

3. Проведение сравнительного анализа десяти типовых сценариев нагрузки для различных сегментов телекоммуникационной инфраструктуры.

4. Оценка экономической эффективности предложенного подхода с учётом баланса между капитальными затратами (CAPEX) и операционными потерями от заблокированных вызовов (OPEX).

Научная новизна работы заключается в интеграции сопоставительного анализа на основе распределения Пуассона с итеративным поиском оптимального количества каналов по критерию GoS, что позволяет количественно оценить компромисс между надёжностью системы и стоимостью её развёртывания. Практическая значимость подтверждается возможностью непосредственного внедрения разработанной методики в инструменты автоматизированного проектирования сетей связи.

Методология

Математическая модель системы с потерями

Рассматривается система массового обслуживания типа M/M/m/m, где:

- входящий поток вызовов является простейшим (пуассоновским) с интенсивностью λ [вызовов/час];

- время занятия канала распределено экспоненциально с параметром μ = 60/$\bar{t}$ [соединений/час], где $\bar{t}$ – средняя длительность вызова в минутах;

- система содержит m идентичных каналов обслуживания;

- при занятости всех каналов новый вызов получает отказ без постановки в очередь (режим потерь).

Предложенная нагрузка, выраженная в эрлангах, определяется как:

$$A_0 = \frac{\lambda}{\mu} [\text{Эрланг}].$$

Вероятность того, что в системе занято ровно k каналов, для идеальной системы M/M/∞ описывается распределением Пуассона:

$$p(k) = e^{-A_0} \cdot \frac{A_0^k}{k!}.$$

Для реальной системы с конечным числом каналов m вероятность блокировки вызова (все каналы заняты) рассчитывается по рекуррентной формуле Эрланга-B:

$$B(0, A_0) = 1, \qquad B(m, A_0) = \frac{A_0 \cdot B(m-1, A_0)}{m + A_0 \cdot B(m-1, A_0)}.$$

Алгоритм итеративного поиска минимального количества каналов

Ключевой задачей проектирования является определение минимального целого числа каналов m_{GoS}, при котором вероятность блокировки не превышает целевого норматива GoS:

$$m_{GoS} = \min\{m \in \mathbb{N}: B(m, A_0) \leq GoS\}.$$

Предложенный алгоритм реализует итеративный перебор значений m, начиная с $\lceil A_0 \rceil$, с использованием рекуррентной формулы для эффективного вычисления B(m, A_0). Алгоритм гарантирует нахождение глобального минимума за $O(m_{GoS})$ операций.

Система технико-экономических показателей

Для комплексной оценки спроектированной системы рассчитывается показателей, объединённых в две группы:

Группа 1: Сопоставительный анализ (M/M/∞)

1. Предложенная нагрузка A_0.
2. Вероятность k занятых каналов p(k), где k = $\lceil A_0 \rceil$.
3. Вероятность пика P(k ≥ $\lceil A_0 \rceil$).
4. Среднее число занятых каналов L = A_0.
5. Дисперсия Var = A_0 и среднеквадратичное отклонение σ = $\sqrt{A_0}$.

6–8. Перцентили распределения $m_{0,90}$, $m_{0,95}$, $m_{0,99}$.

9. Вероятность простоя $p(0) = e^{-A_0}$.

10, Коэффициент вариации $c = \sigma/L$.

Группа 2: Реальная модель (Эрланг)

11. Минимальное количество каналов m_{GoS}.
12. Фактическая вероятность блокировки $P_{block} = B(m_{GoS}, A_0)$.
13. Эффективная пропускная способность $\lambda_{eff} = \lambda(1 - P_{block})$.
14. Переносимая нагрузка $A_{carried} = A_0(1 - P_{block})$.
15. Коэффициент использования канала $\rho = \frac{A_{carried}}{m_{GoS}}$.
16. Интенсивность потерь $\lambda_{loss} = \lambda \cdot P_{block}$.
17. Относительные потери $P_{rel} = P_{block} \cdot 100\%$.
18. Запас по ёмкости $\Delta m = m_{GoS} - \lceil A_0 \rceil$.
19. Коэффициент эффективности $\eta = \frac{A_{carried}}{m_{GoS}}$.
20, Отношение нагрузки к каналам $r = \frac{A_0}{m_{GoS}}$.

Экономическая модель оптимизации

Для оценки экономической целесообразности выбранного m_{GoS} используется модель совокупной месячной стоимости:

$$C_{\text{total}}(m) = C_{CAPEX} \cdot m + C_{OPEX} \cdot \lambda \cdot B(m, A_0) \cdot T,$$

где C_{CAPEX} – условная стоимость содержания одного канала в месяц;

C_{OPEX} – условные потери от одного заблокированного вызова;

T – количество часов в расчётном периоде (720 часов/месяц).

Оптимальное значение m_{opt} определяется как аргумент минимума функции $C_{total(m)}$ при ограничении $B(m, A_0) \leq GoS$.

Результаты расчетов

Детальный анализ эталонного сценария

В качестве эталонного примера рассмотрен сценарий проектирования магистрального транка корпоративной АТС со следующими параметрами:

- Интенсивность вызовов $\lambda = 360$ вызовов/час;
- Средняя длительность $\bar{t} = 3$ минуты;
- Целевой норматив GoS = 1%.

Расчёт даёт предложенную нагрузку $A_0 = 18$ Эрланг. Результаты расчёта показателей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчёта эталонного сценария ($A_0 = 18$ Эрланг, GoS = 1%)

№	Показатель	Значение	Интерпретация
1	Предложенная нагрузка A_0	18,0000 Эрланг	Средняя нагрузка на систему
2	P(k=18)	0,0936	Вероятность ровно 18 занятых каналов
3	P(k≥18)	53,14%	Вероятность пика относительно средней нагрузки
4	Среднее число занятых L	18,0000	Математическое ожидание загрузки
5	σ, Var	4,2426, 18,0000	Мера флуктуаций нагрузки
6	$m_{0,90}$	24	90% вызовов укладываются в 24 канала
7	$m_{0,95}$	25	Стандартный ориентир для планирования
8	$m_{0,99}$	29	Консервативный запас для высокой надёжности
9	p(0)	$1{,}52 \cdot 10^{-8}$	Вероятность полного простоя системы
10	Коэффициент вариации c	0,2357	Относительная изменчивость нагрузки
11	m_{GoS} (итерация)	28 каналов	Оптимальное решение по критерию GoS
12	Фактическая P_{block}	0,71%	Достигнутое качество (≤ 1,0%)
13	λ_{eff}	357,45 выз/час	Эффективно обслуженный трафик
14	$A_{carried}$	17,87 Эрланг	Переносимая полезная нагрузка
15	ρ	63,83%	Коэффициент использования канала
16	λ_{loss}	2,55 выз/час	Интенсивность потерянных вызовов
17	Относительные потери	0,71%	Доля заблокированных вызовов
18	Запас Δm	10 каналов	Резерв относительно средней нагрузки
19	η	0,6383	Эффективность использования ресурсов
20	$r = A_0/m$	0,6429	Отношение нагрузки к ёмкости

Ключевой вывод: минимальное количество каналов, обеспечивающее GoS ≤ 1%, составляет $m_{GoS} = 28$, что на 10 каналов превышает среднюю нагрузку $A_0 = 18$. Фактическая вероятность блокировки при этом составляет 0,71%, что обеспечивает запас по качеству 0,29 процентных пункта.

Сравнительный анализ десяти типовых сценариев

Для оценки универсальности предложенной методики проведён расчёт десяти типовых сценариев, охватывающих различные сегменты телекоммуникационной инфраструктуры: от магистральных транков PSTN до колл-центров и служб технической поддержки. Параметры сценариев и ключевые результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сводные результаты расчёта десяти вариантов

Сценарий	A_0	GoS	$m_{0,95}$	m_{GoS}	P_{block}	ρ	Δm
PSTN транк	8,00	1,0%	13	15	0,91%	52,8%	7
VoIP шлюз	7,50	1,0%	12	14	0,57%	49,7%	7
БС 3G	10,00	2,0%	15	17	1,29%	58,1%	7
Корп, АТС	7,50	1,5%	12	14	1,14%	53,0%	6
Междуг, комм,	6,00	1,0%	11	13	0,52%	45,9%	7
Колл-центр	5,00	5,0%	9	9	3,75%	53,5%	4
Техподдержка	6,00	2,0%	11	12	1,14%	49,4%	6
Служба доставки	6,67	1,0%	12	14	0,50%	47,4%	7
Онлайн-консультант	5,83	2,0%	11	11	1,99%	52,0%	5
Страховая	4,80	1,0%	10	11	0,65%	43,4%	6

Анализ результатов позволяет сформулировать следующие закономерности:

1. Линейная зависимость m_{GoS} от A_0: При фиксированном GoS количество требуемых каналов растёт приблизительно линейно с увеличением предложенной нагрузки, однако коэффициент пропорциональности зависит от целевого норматива качества.

2. Влияние норматива GoS: Ужесточение требования к качеству (снижение GoS с 2% до 1%) приводит к увеличению m_{GoS} на 1–2 канала при одинаковой нагрузке, что соответствует дополнительным капитальным затратам порядка 10–20%.

3. Оптимальный коэффициент использования: Во всех сценариях коэффициент использования канала ρ находится в диапазоне 43–58%, что подтверждает необходимость резервирования ресурсов для обеспечения требуемого качества обслуживания.

4. Запас по ёмкости Δm: Величина резерва варьируется от 4 до 10 каналов и коррелирует с дисперсией нагрузки ($\sigma = \sqrt{A_0}$), что согласуется с теоретическими предсказаниями распределения Пуассона.

Экономическая оптимизация и анализ чувствительности

На основе экономической модели проведён анализ зависимости совокупной стоимости от количества каналов для эталонного сценария. При

условных параметрах $C_{CAPEX} = 100$ у.е./канал/месяц и $C_{OPEX} = 5$ у.е./заблокированный вызов оптимальное значение m_opt = 28 каналов полностью совпадает с m_{GoS}, найденным по критерию GoS. Это свидетельствует о том, что норматив качества обслуживания в рассматриваемом диапазоне параметров является доминирующим ограничением по сравнению с прямыми экономическими соображениями.

Анализ чувствительности показывает, что отклонение m от оптимального значения на ±1 канал приводит к изменению совокупной стоимости на 3–7%, что подчёркивает важность точности расчётов при проектировании крупномасштабных сетей.

Предложенная методология демонстрирует ряд преимуществ по сравнению с традиционными подходами к планированию ёмкости сетей:

1. Точность: Использование аналитической модели Эрланга-В обеспечивает точный расчёт вероятности блокировки без необходимости имитационного моделирования, что критически важно для оперативного принятия решений.
2. Воспроизводимость: Все расчёты выполняются детерминированным алгоритмом, что исключает субъективные ошибки и обеспечивает сопоставимость результатов при повторных расчётах.
3. Расширяемость: Архитектура системы показателей позволяет легко добавлять новые метрики (например, учёт приоритетных вызовов, динамическое перераспределение каналов) без изменения базового алгоритма.
4. Интеграция с экономическими моделями: Совмещение вероятностного анализа с моделью совокупной стоимости позволяет проводить многокритериальную оптимизацию с учётом как технических, так и финансовых ограничений.

Ограничения исследования связаны с принятыми допущениями: пуассоновский характер входящего потока, экспоненциальное распределение времени занятия, отсутствие повторных попыток вызова. Для сценариев с существенно нестационарной нагрузкой или сложными дисциплинами обслуживания может потребоваться использование более сложных моделей (например, Erlang-C для систем с очередью) или имитационного моделирования.

В статье разработана и верифицирована методология итеративного расчёта минимального количества каналов в телекоммуникационных сетях с потерями на основе модели Эрланга. Ключевые результаты исследования включают:

1. Формализован алгоритм автоматизированного расчёта технико-экономических показателей, объединяющий сопоставительный анализ идеальной системы и расчёт реальной модели с конечным числом каналов.
2. Продемонстрирована применимость методики к десяти типовым сценариям нагрузки, охватывающим различные сегменты телекоммуникационной инфраструктуры.

3. Показано, что оптимальный коэффициент использования каналов составляет 43–58%, а запас по ёмкости варьируется в диапазоне 4–10 каналов в зависимости от предложенной нагрузки и целевого норматива GoS.

4. Подтверждена экономическая целесообразность предложенного подхода: точный расчёт m_{GoS} позволяет экономить 1–2 канала на сценарий по сравнению с эмпирическими методами, что при масштабировании на крупные сети даёт существенную экономию капитальных затрат.

Практическая значимость работы заключается в возможности непосредственного внедрения разработанной методики в инструменты автоматизированного проектирования сетей связи, системы мониторинга качества обслуживания и платформы для принятия управленческих решений. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением модели для учёта нестационарных нагрузок, приоритетного обслуживания и динамического перераспределения ресурсов в программно-конфигурируемых сетях (SDN/NFV).

Список литературы

1. Cisco. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. – San Jose: Cisco Systems, Inc., 2020, – 52 p. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490,html (дата обращения: 15.01.2026).
2. ETSI TS 102 250-2 V2.7.1 (2019-11). Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); QoS aspects for popular services in mobile networks; Part 2: Definition of Quality of Service (QoS) parameters. – Sophia Antipolis: European Telecommunications Standards Institute, 2019. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102200_102299/10225002/02.07.01_60/ts_10225002v020701p.pdf (дата обращения: 15.01.2026).
3. Батенков, К. А. Анализ надежности двухполюсных сетей связи на основе метода приведения (редукции) / К. А. Батенков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2025. – Т. 28, № 6. – С. 56–70, – DOI 10,32603/1993-8985-2025-28-6-56-70, – EDN HXNUDF.
5. Papoulis, A., Pillai, S.U. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. – 4th ed. – New York: McGraw-Hill, 2002. – 664 p. – ISBN: 978-0-07-119981-0,
6. 3GPP Technical Specification TS 23.228: IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2 (Release 19, Version 19.5.0). – Sophia Antipolis, Valbonne – FRANCE: 3rd Generation Partnership Project, 2025. – 472 p. – URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.228/23228-h40,zip (дата обращения: 15.01.2026). – Текст: электронный.
7. Gross, D., Shortle, J.F., Thompson, J.M., Harris, C.M. Fundamentals of Queueing Theory. – 5th ed. – Hoboken: Wiley, 2018. – 800 p. – ISBN: 978-1-118-94352-6.
8. Ross, S.M. Introduction to Probability Models. – 12th ed. – Cambridge: Academic Press, 2019. – ISBN: 978-0128143476.
9. ITU-T Recommendation E.600, Terms and definitions of traffic engineering. – Geneva: International Telecommunication Union. – URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-E.600-199303-I!!PDF-E&type=items (дата обращения: 15.01.2026).

Садовченко Е.А.
аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
sadovchenko.e@compmechlab.ru
Жмайло М.А.
ведущий инженер Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
zhmaylo@compmechlab.com
Боровков А.И.
к.т.н., директор Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург

МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. В настоящей работе рассматривается подход к оценке стабильности дентальных имплантатов на основе цифровых испытаний. Стабильность является одним из ключевых показателей качества, характеризующим степень остеоинтеграции и фиксацию имплантата в костной ткани. Наиболее распространённым клиническим методом её оценки является частотно-резонансный анализ (RFA). Авторами обосновано, что RFA-прибор фактически измеряет первую собственную частоту системы, что позволяет заменить физические измерения на этапе разработки модальным анализом в инженерных расчётных комплексах. Численное моделирование даёт возможность количественно прогнозировать первичную стабильность, выбирать оптимальный дизайн имплантата и протокол установки до начала прототипирования. Предложенный подход не отменяет клинического применения RFA, но значительно сокращает сроки и затраты на разработку, повышая качество продукции.

Ключевые слова: показатели качества, стабильность, дентальный имплантат, контроль качества, цифровые испытания.

Sadovchenko E.A.
Postgraduate Student
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
sadovchenko.e@compmechlab.ru
Zhmaylo M.A.
Lead Engineer Advanced engineering school «Digital engineering»
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
zhmaylo@compmechlab.com
Borovkov A.I.
Candidate of Technical Sciences, Director of Advanced engineering school «Digital engineering»
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg

METHOD FOR QUALITY CONTROL OF DENTAL IMPLANTS BASED ON DIGITAL TESTING

Abstract. This paper considers an approach to assessing the stability of dental implants based on digital tests. Stability is one of the key quality indicators characterizing the degree of osseointegration and fixation of the implant in the bone tissue. The most common clinical method of its assessment is frequency resonance analysis (RFA). The authors proved that the RFA device actually measures the first natural frequency of the system, which makes it possible to replace physical measurements at the development stage with modal analysis in engineering calculation complexes. Numerical modeling makes it possible to quantify the primary stability, choose the optimal implant design and installation protocol before prototyping. The proposed approach does not negate the clinical application of RFA, but significantly reduces the time and cost of development, improving product quality.

Keywords: quality indicators, stability, dental implant, quality control, digital testing.

Современная стоматология всё чаще сталкивается с ситуацией, когда заболевания полости рта приводят к необратимой утрате зубов. Удаление становится вынужденной, но зачастую неизбежной мерой, после которой перед пациентом и врачом встаёт вопрос о том, как полноценно восполнить образовавшийся дефект. Традиционные мостовидные протезы, хотя и не теряют своей актуальности, не способны предотвратить главные долгосрочные последствия удаления, такие как атрофию костной ткани в зоне утраченного зуба и постепенное смещение соседних единиц. В связи с этим дентальная имплантация рекомендуется в качестве приоритетного метода лечения [1].

Дентальный имплантат представляет собой конструкцию из титанового сплава, фиксируемую хирургическим путём в костной ткани челюсти [2]. Имплантат служит своего рода «искусственным корнем», на который в дальнейшем фиксируется коронка или ортопедическая конструкция. Такой подход позволяет не только восстановить жевательную функцию в полном объёме, но и добиться естественной эстетики улыбки, не травмируя при этом соседние зубы.

Ключевым фактором успеха имплантологического лечения является не только мастерство врача, но и качество самого имплантата. На этапах разработки, проектирования и серийного производства решающую роль играет система контроля качества. Её постоянное совершенствование напрямую влияет на итоговые характеристики изделия – от точности геометрии резьбы до чистоты поверхности и биохимической совместимости с тканями организма. Чем продуманнее контроль на всех стадиях создания имплантата, тем выше качество продукции и ниже вероятность инфекционных и механических осложнений, а также увереннее можно прогнозировать долгосрочную клиническую эффективность. В конечном счёте это означает не просто успешную остеоинтергацию имплантата с костной тканью, но и реальное повышение качества жизни пациента [3] – без боли, дискомфорта и риска

повторных вмешательств. Таким образом, совершенствование производственного контроля в области дентальной имплантологии является не просто технологической задачей, а важнейшим звеном в цепочке, ведущей к безопасному, функциональному и эстетичному восстановлению зубного ряда.

Для контроля качества производства дентальных имплантатов применяется комплексный показатель, формируемый на основе единичных показателей, таких как точность изготовления, качество поверхности, прочностные характеристики и стабильность. Стабильность характеризует фиксацию имплантата в костной ткани и позволяет количественно оценить степень остеоинтеграции [4, 5]. Данный показатель является одним из основных при установке имплантата, поскольку именно от него зависит объективная оценка успешности операции. На итоговую стабильность влияют плотность костной ткани в области установки, дизайн и размеры имплантата, а также протокол операции.

Цель данной работы – краткое описание подхода к оценке стабильности дентальных имплантатов на основе цифровых испытаний, позволяющих на этапе разработки продукции определить оптимальный дизайн и протокол установки.

В настоящее время для оценки стабильности используют различные подходы, такие как частотно-резонансный анализ [6], метод крутящего момента и рентгенологический анализ. Наиболее популярным методом оценки стабильности дентальных имплантатов является частотно-резонансный анализ (RFA, Resonance Frequency Analysis), который позволяет бесконтактным способом количественно измерить степень остеоинтеграции [7].

В основе описанного метода лежит зависимость резонансной частоты системы от жёсткости соединения имплантата с окружающей костной тканью [8]. Чем выше степень интеграции, тем больше жёсткость системы и тем выше измеряемая резонансная частота.

В современных RFA-приборах, представленных на рынке (Osstell ISQ, Penguin RFA), используется магнитный принцип возбуждения колебаний. В первую очередь в имплантат временно устанавливают металлический стержень с магнитом на конце. Далее с помощью измерительного зонда подаются магнитные импульсы, вызывающие микровибрации штифта, и регистрируется ответный сигнал. Прибор определяет резонансную частоту и преобразует её в значение ISQ (Implant Stability Quotient).

Шкала ISQ представляет собой стандартизированную количественную оценку в диапазоне от 1 до 100 условных единиц, введенную в 2003 году с целью унификации измерений и упрощения клинической интерпретации.

Значения ISQ интерпретируются следующим образом: 70 и более единиц соответствуют высокой стабильности, допускающей немедленную нагрузку; 60-69 – средней, требующей отсроченной нагрузки; менее 60 – низкой, при которой необходим удлиненный период заживления. Ключевое значение также имеет не столько однократное измерение, а динамика показателя.

Поскольку принцип работы устройства Osstell основан на импульсном магнитном воздействии на магнитный элемент абатмента, что возбуждает свободные колебания в системе «имплантат – штифт», можно обоснованно предположить, что прибор фактически измеряет первую собственную частоту данной сборки, которая напрямую характеризует жесткость фиксации имплантата в костной ткани. При проведении численных экспериментов оценку этой частоты достаточно выполнить с помощью модального анализа. Моделировать процесс работы самого устройства Osstell не требуется, поскольку модальный анализ является стандартным инструментом современных инженерных расчетных комплексов.

После проведения модального анализа необходимо сравнить значения полученных собственный частот. Чем выше частота, тем большую первичную стабильность будет демонстрировать имплантат в костной ткани, что также связано с меньшей микроподвижностью и более благоприятными условиями для остеоинтеграции.

Использование цифровых испытаний [9] для оценки стабильности имплантата позволяет значительно сократить сроки производства продукции, повысить качество продукции путем выбора оптимального дизайна до этапа прототипирования и избежать дорогостоящих итераций с физическими образцами. При этом важно подчеркнуть, что предложенный подход не отменяет необходимости использовать RFA-методику для оценки динамики стабильности имплантата у пациентов, а является дополнительным инструментом именно при разработке продукции.

В работе предложен подход к оценке стабильности дентальных имплантатов на основе цифровых испытаний с использованием модального анализа. Показано, что измеряемая прибором Osstell резонансная частота фактически соответствует первой собственной частоте системы «имплантат –штифт», что позволяет заменить физические RFA-измерения на этапе разработки изделия численным моделированием.

Использование описанной методики даёт возможность количественно оценить жёсткость соединения имплантата с костной тканью и, следовательно, его первичную стабильность. Чем выше рассчитанная собственная частота, тем меньше ожидаемая микроподвижность и тем благоприятнее условия для остеоинтеграции.

Предлагаемый метод цифровых испытаний не заменяет клиническое применение RFA для мониторинга стабильности у конкретного пациента, но выступает мощным инструментом на этапе проектирования и подготовки производства. Таким образом, внедрение цифровых испытаний в процесс контроля качества дентальных имплантатов является эффективным дополнением к существующим методам и способствует созданию более надёжных, безопасных и клинически предсказуемых изделий.

Список литературы

1. Alghamdi HS, Jansen JA. The development and future of dental implants. Dent Mater J. 2020;39(2): P. 167–172.
2. Карл Е. Миш. Ортопедическое лечение с опорной на дентальные имплантаты//Руководство для стоматологов ортопедов, имплантологов, челюстно-лицевых хирургов, студентов и преподавателей медицинских вузов и факультетов. 2017.
3. Tudose, M. S. Quality of life changes after full-mouth rehabilitation with dental implants in edentulous patients / M. S. Tudose // Professional Research in Healthcare. – 2025. – No. 3. – P. 82–89.
4. Atsumi, M. Methods used to assess implant stability: current status / M. Atsumi, S.-H. Park, H.-L. Wang // International Journal of Oral & Maxillofacial Implants. – 2007. – Vol. 22, № 5. – P. 743–754.
5. Остапович, А. А. Динамика стабильности дентальных имплантатов в процессе их остеоинтеграции . – Белгород, 2024. – с. 432–436.
6. Мушеев И. У., Маркин В. А., Олесова В. Н., Арутюнов А. С. «Динамика показателей RFA-тестирования дентальных имплантатов при их немедленной или отсроченной нагрузке» // Панорама ортопедической стоматологии. – 2005. – № 4. – С. 30–32.
7. Guglielmotti MB, Olmedo DG, Cabrini RL. Research on implants and osseointegration. Periodontol. 2019;79(1): P. 178-189.
8. Ерошин В.А., Джалалова М.В., Бойко А.В., Арутюнов С.Д., & Степанов А.Г. (2016). Коэффициенты продольной стабильности дентальных имплантатов. Российский журнал биомеханики, 20 (3), с. 236–248.
9. Demirbas, A.E., Ekici, R., Karakaya, M., Alkan, A. Bone stress and damage distributions during dental implant insertion: a novel dynamic FEM analysis. Computational Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2022, 25(12): P. 1381–1392.

Симонов М.В.
руководитель Центра компетенций по развитию интегрированного моделирования активов Научно-технического центра «Газпром нефть»
Россия, Санкт-Петербург
Simonov.MV@gazprom-neft.ru
Мартынец Е.Р.
младший научный сотрудник Отдела технологического и промышленного форсайта
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
martynets.e@compmechlab.ru
Корниенко А.В.
ведущий специалист Управления контроля качества
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
kornienko_av@spbstu.ru

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Нейросети позволяют снизить ресурсоемкость решаемых задач при проектировании производственных систем, выявить скрытые нелинейности и зависимости, а также непрерывно обучаются, что делает их эффективным инструментом. С позиции управления качеством в статье рассмотрены возможности нейросетей по снижению вариабельности проектных решений, повышению точности прогнозирования выходных характеристик системы и обеспечению ее адаптивности к изменяющимся условиям. В статье рассмотрены причины, которые обуславливают внедрение нейросетевых подходов в различные сферы промышленности, приведены преимущества внедрения нейросетей в процессы управления качеством и организации производства.

Учитывая, что качество закладывается на начальном этапе проектирования производственных систем, целесообразно систематизировать основные аспекты внедрения и применения нейросетевых методов как сквозных инструментов управления качеством на этапах создания системы и формирования ее оптимальной структуры с учетом разнообразных противоречивых параметров и неопределенности. Тем самым применение нейросетевого подхода обеспечивает повышение обоснованности проектных решений, сокращение итераций по доработке системы и снижение рисков несоответствия процессов системы целевым параметрам. Представленная в статье концептуальная модель применения нейросетевого подхода в проектировании производственной системы является примером систематизации обозначенных аспектов и направлена на практическое применение при моделировании сложных производственных систем.

Ключевые слова: производственная система, нейросетевой подход, управление качеством, качество процессов, организация производства.

Simonov M.V.
Head of the Competence Center for the Development of Integrated Asset Modeling of Scientific and Technical Center
Gazprom Neft
Russia, Saint Petersburg

Simonov.MV@gazprom-neft.ru
Martynets E.R.
Junior Researcher at the Department of Technological and Industrial Foresight
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
martynets.e@compmechlab.ru
Kornienko A.V.
Leading specialist of the Quality Control Department
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
kornienko_av@spbstu.ru

NEURAL NETWORK APPROACH AS A QUALITY MANAGEMENT TOOL IN THE ENGINEERING AND ORGANIZATION OF PRODUCTION SYSTEMS

Abstract. Neural networks can reduce the resource intensity of tasks to be solved performed in the design of production systems, identify hidden nonlinearities and dependencies, and are continuously trained, which makes them the effective tool. From the perspective of quality management, the possibilities of neural networks to reduce the variability of design decisions, improve the accuracy of predicting the output characteristics of the system and ensure its adaptability to changing conditions are considered. The article discusses the reasons that lead to the implementation of neural network approaches in various industries, and the advantages of implementing neural networks into quality management and production organization processes.

Considering that quality is established at the initial stage of production systems design, it is advisable to systematize the main aspects of the implementation and application of neural network methods as end-to-end quality management tools at the stages of engineering the system and forming its optimal structure taking into account a variety of contradictory parameters and uncertainties. Thus, the application of the neural network approach ensures an increase in the validity of design decisions, a reduction in iterations to refine the system and a reduction in the risks of non-compliance of the system processes with the target parameters.

The conceptual model of applying the neural network approach in the engineering of a production system presented in the article is an example of the systematization of these aspects and is aimed at practical application in modeling of complex production systems.

Keywords: production system, neural network approach, quality management, process quality, organization of production.

Современная промышленная экосистема претерпевает масштабные изменения, вызванные усилением роли цифровых технологий в промышленных, организационных и бизнес-процессах. Массовое внедрение цифровых и производственных технологий способствует увеличению объема генерируемых больших данных, поскольку каждый оцифрованный процесс сопровождается изменением отслеживаемых показателей (вследствие чего формируется цифровой след изменений) и контролем сопутствующих процессов на предприятии.

Данный тренд прослеживается и в области управления качеством – формирование концепции «Качество 4.0» (Quality 4.0) [1–3] направлено на совершенствование методов контроля качества и обеспечения требуемого уровня качества на различных этапах жизненного цикла производственной системы за счет внедрения передовых цифровых и производственных технологий.

Стоит отметить, что понятие производственной системы имеет многообразие трактовок в зависимости от контекста применения, в связи с чем для целей исследования достаточно применить авторское определение. Так, производственная система в данном исследовании рассматривается как целостная совокупность взаимосвязанных элементов предприятия, включая технологические процессы, технические средства, информационно-управляющие подсистемы, которые функционируют в рамках единого жизненного цикла в специфических условиях и обеспечивают эффективное преобразование ресурсов в конечный продукт заданного качества в рамках рациональной организации производства.

Данное исследование сфокусировано на аспектах применения нейросетевых подходов и цифровых технологий интеллектуального анализа данных применительно к процессам управления качеством при проектировании производственных систем, в том числе во взаимосвязи с технологиями цифрового проектирования и моделирования. Данный комплекс технологий является одним из перспективных направлений развития в области управления качеством, обладает высокой эффективностью и открывает широкие возможности для прорывных улучшений и инноваций в сравнении с традиционными методами анализа и прогнозирования показателей работы системы, что является гипотезой исследования и напрямую соответствует целям концепции «Качество 4.0» (Quality 4.0).

Методологию теоретико-аналитического исследования составил системный подход в области цифровых технологий управления качеством, в том числе инструменты применения нейросетевых моделей. Результаты теоретического анализа позволяют выделить основные преимущества, получаемые за счет внедрения современного инструментария теории качества производственных систем, в соответствии со стадиями жизненного цикла.

По результатам выполнения научно-исследовательских работ и разработки практикоориентированных подходов к совершенствованию процессов на предприятиях, сформирована авторская концептуальная схема применения нейросетевого подхода к проектированию производственной системы, направленная на повышение качества основных и вспомогательных процессов на этапе проектирования.

Согласно определению [4], искусственная нейронная сеть – это сложная дифференцируемая функция, задающая отображение из исходного признакового пространства в пространство ответов, все параметры которой могут настраиваться одновременно и взаимосвязанно. Нейросеть способна обучаться на примерах, включая исторические данные, результаты модели-

рования, экспертные оценки, и выявлять скрытые, нелинейные, многомерные закономерности между входными параметрами и выходными показателями, что определяет ее многопараметричность.

Системы интеллектуального анализа данных наряду с нейросетевыми технологиями могут получать данные из разных источников, включая интегрированные системы управления производством, ресурсами и другими элементами производственной системы. Важно отметить возможность формирования взаимосвязи между нейросетевой моделью и численными моделями исследуемой системы – их интеграция в единую гибридную модель [5; 6] обеспечивает комплексность моделирования процессов работы системы, усиливает результаты сквозного аналитического исследования системы и формирует тем самым петлю качества с непрерывным улучшением результатов моделирования в режиме реального времени, что является важным на этапах оптимизации системы.

Причины, по которым нейросетевые подходы активно внедряют в процессы проектирования производственных систем, включают:

- возрастание сложности и размерности проектных задач (классические методы исследования и оптимизации сталкиваются с так называемым «проклятием размерности» [7]);
- нелинейность и нестационарность процессов;
- неполнота и искажение исходных данных;
- потребность в сокращении времени и стоимости разработки [8];
- эволюция и дообучение нейросетевой модели, расширение проектных решений и др.

В таблице приведены ключевые примеры и способы применения нейросетевых технологий на различных этапах жизненного цикла производственной системы, а также обозначены значимые преимущества и положительные результаты применения данных технологий в промышленности в сочетании с технологиями цифрового проектирования и моделирования при использовании гибридного подхода и с учетом требований к ожидаемому уровню качества.

Таблица

Нейросетевой подход как инструмент управления качеством при проектировании и организации производственных систем

№ п/п	Способ применения	Этап жизненного цикла	Преимущества и положительный результат	Источники
1	*2*	*3*	*4*	*5*
1	Автоматизация задач, требующих обработки больших объемов операционных данных	Проектирование и разработка, Создание, Эксплуатация, Вывод из эксплуатации, Управленческие процессы	Ускорение формирования исходной информации, требуемой для принятия стратегических решений, Повышение эффективности процессов (в т.ч. планирования) и снижение количества ошибок, Контроль соблюдения требований и достижения показателей, Повышение безопасности, Минимизация человеческого фактора	[9] [10]

Окончание таблица

1	*2*	*3*	*4*	*5*
2	Прогнозирование и выявление аномалий на основе исторических данных и результатов моделирования	Проектирование и разработка, Создание, Эксплуатация, Вывод из эксплуатации	Своевременное выявление отклонений, деформаций, отказов, рисков, колебаний, закономерностей, трендов и проч., Своевременное принятие корректирующих действий, Рекомендации по минимизации узких мест, простоев, потерь, Оптимизация процессов, Предиктивное обслуживание, Экономия средств, Повышение безопасности, Минимизация человеческого фактора	[9] [11] [12] [13] [14]
3	Отслеживание процесса с применением машинного зрения, интернета вещей	Создание, Эксплуатация, Вывод из эксплуатации, Управленческие процессы	Рекомендации по результатам анализа больших объемов данных, Повышение скорости и качества входного контроля, Повышение точности и скорости выявления дефектов, Контроль соблюдения требований и достижения показателей, стабильности процессов, Экономия средств, Повышение безопасности, Минимизация человеческого фактора	[9] [12] [14]

Источник: составлено авторами по результатам анализа

Таким образом, отмечается высокая эффективность внедрения нейросетевого подхода на разных стадиях жизненного цикла производственной системы и повышение качества процессов производственной системы, что подтверждает гипотезу исследования.

Безусловно, внедрение цифровых технологий сопровождается соответствующими затратами, а также требует определенного подготовительного процесса при соблюдении требований безопасности и этики. Развитие и корректное функционирование нейросетевых технологий возможно только при условии большого объема полезных данных из разных источников, задействованных для обучения нейросети как на этапе разработки, так и в ходе эксплуатации модели. При этом качество самих данных должно быть не просто на высоком уровне – данные должны быть очищены, нормализованы, соответствующим образом подготовлены и размечены для эффективного процесса обучения. Кроме того, наблюдается сложность в перенастройке сети при изменении параметров исследуемого объекта, например при смене характеристик процесса или вмешательстве в исходный процесс, что требует генерации новых данных и переобучения для адаптации модели.

Как известно, качество закладывается на этапе проектирования [15] системы до ввода ее в эксплуатацию, поскольку определяются основные параметры системы, формируется капитало- и ресуркоемкость развертывания системы, что особенно важно в контексте масштабирования цифровой

трансформации производственных систем. В связи с этим фокусировка исследования на стадии проектирования системы с применением рассматриваемых в статье нейросетевых технологий предполагает целенаправленное сосредоточение на разработке превентивных механизмов обеспечения качества, которые позволяют:

- обеспечить стабильность производственных процессов системы до их физического воплощения;
- минимизировать затраты и оптимизировать требуемый объем ресурсов для функционирования системы (экономическая эффективность);
- повысить точность прогнозирования работы системы и обеспечить интеллектуальную поддержку принятия решений;
- сформировать высокоэффективный инструмент последовательного развертывания системы от ее проектирования до вывода из эксплуатации с учетом требований к системе, ее технической сложности, ожидаемого уровня качества, прослеживаемости процессов и непрерывной адаптации параметров к изменяющимся условиям.

В связи с этим приведем концептуальную модель ключевых аспектов применения нейросетевого подхода на стадии проектирования производственной системы (см. Рисунок), которая обеспечивает требуемый уровень качества процессов функционирования системы на последующих стадиях жизненного цикла.

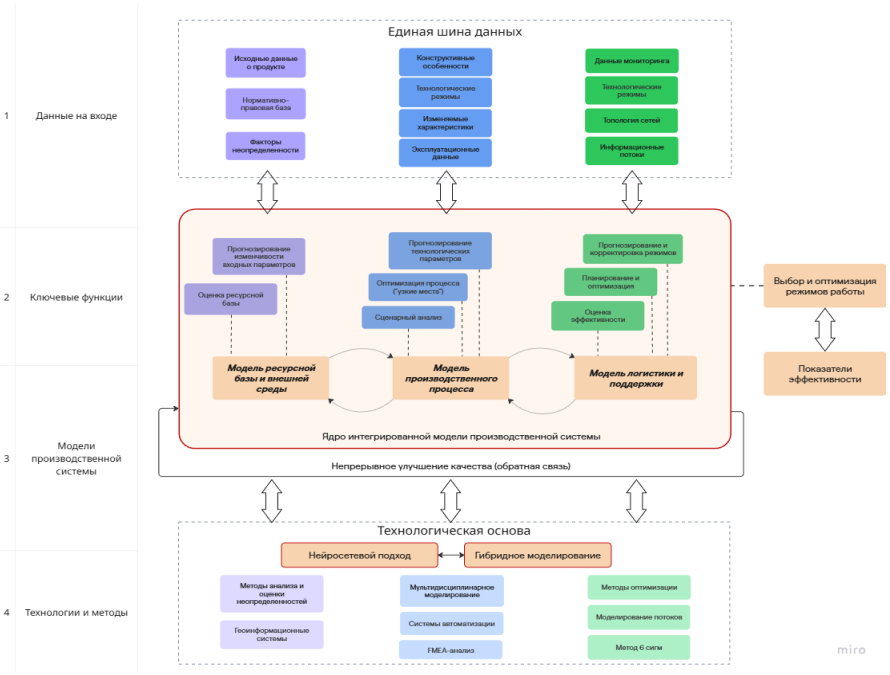


Рис. Концептуальная модель применения нейросетевого подхода в проектировании производственной системы (Источник: составлено авторами)

Данная модель содержит 4 ключевых слоя – исходные данные, модели-компоненты интегрированной модели производственной системы, соответствующие ключевые функции моделей, технологии, составляющие основу

процесса проектирования системы с учетом применения нейросетевого подхода и гибридного моделирования.

Таким образом, внедрение нейросетевых технологий во взаимосвязи с численным моделированием в критически важных отраслях промышленности способствует многократному повышению эффективности отслеживания процессов, прогнозирования параметров, принятия решений и другим не менее значимым результатам, приведенным выше. Представленная в статье авторская концептуальная модель направлена на повышение качества процессов производственной системы, что обеспечивает повышение точности прогнозирования выходных характеристик и обоснованное принятие решений в процессе проектирования и организации производственной системы на основе нейросетевого подхода.

Вопросы адаптации разработанной концептуальной модели к конкретным областям применения в производственной системе с учетом отраслевой специфики, а также механизмы внедрения обозначенной модели требуют отдельной тщательной проработки и будут рассмотрены в следующих исследованиях.

Список литературы

1. From total quality management to Quality 4.0: A systematic literature review and future research agenda / H.-C. Liu, R. Liu, X. Gu [et al.] // Engineering Management. 2023. Т. 10, № 2. – С. 191–205.
2. Implementing and evaluating the quality 4.0 PMQ framework for process monitoring in automotive manufacturing / F. Alkhatib, M. Allam, V. Swarnakar [et al.] // Scientific Reports. 2025. Т. 15. – С. 1–20,
3. Левенцов А.Н. Качество и цифровая трансформация / А.Н. Левенцов, В.А. Левенцов, В.В. Ходырев // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 5–2. – С. 302–305.
4. Толстых В.Н. Нейронные сети для экстраполяции временных рядов / В.Н. Толстых // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2023. – Т. 15. № 6. – С. 4–11.
5. Опыт использования гибридных моделей в группе компаний Газпром нефть / М.В. Симонов, Н.С. Марков, А.А. Афанасьев [и др.] // Геомодель 2024 : Сборник материалов 26-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. 2024. – С. 442–445.
6. Reduced order reservoir simulation with neural-network based hybrid model / P. Temirchev, A. Gubanova, R. Kostoev [et al.] // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2019. – С. 1–17.
7. Проклятие размерности – Loginom [сайт]. URL: https://loginom.ru/blog/curse-dimensionality (дата обращения: 24.04.2026).
8. Мартынец Е.Р. Совершенствование процесса разработки изделий с применением цифровых двойников / Е.Р. Мартынец // Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии : Сборник докладов X Всероссийской научно-практической Интернет-конференции. 2025. – С. 206–209.
9. Нейросети в СМК – Экспертные статьи ProКачество [сайт]. URL: https://kachestvo.pro/innovatsii/neyroseti-v-smk/ (дата обращения: 10,04.2026).

10. Внедрение искусственного интеллекта в промышленности: нейросети для бизнеса [сайт]. URL: https://sber.pro/publication/vnedrenie-ai-v-promishlennoe-proizvodstvo-ot-prediktivnogo-obsluzhivaniya-do-kontrolya-kachestva/ (дата обращения: 10,04.2026).

11. Корниенко А.В. Алгоритм мониторинга надежности технологического оборудования с применением технологии цифровых двойников / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Национальные концепции качества: роль качества в стратегиях социально-экономического развития в новом мире : Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции. 2024. – С. 148–151.

12. Как искусственный интеллект и машинное обучение переосмысливают контроль качества продукции [сайт]. URL: https://synaptik.ru/blog/kak-it-resheniya-uluchshayut-kachestvo-produkczii/kak-iskusstvennyj-intellekt-i-mashinnoe-obuchenie-pereosmyslivayut-podhod-k-kachestvu-produkczii (дата обращения: 08.04.2026).

13. Полетаев А.А. Нейросетевой метод технической диагностити оборудования по спектрам виброскорости и выброускорений / А.А. Полетаев, А.Е. Яблоков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. – С. 476–481.

14. Никитин Г.А. Применение нейросетей при контроле качества продукции в машиностроительном производстве / Г.А. Никитин, О.В. Алексашина // Российские регионы в фокусе перемен : Сборник докладов XVII Международной конференции. 2023. – С. 672-675.

15. Мартынец Е.Р. Цифровые двойники изделий как инструмент обеспечения качества на стадии разработки / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации : сборник научных трудов III Всероссийской студенческой учебно-научной конференции. 2024. – С. 286-290,

Яроцкая Н.А.
аспирант
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
yarotskayana@Student.bmstu.ru
Постникова Е.С.
к.т.н., доцент кафедры «Экономика и организация производства»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
postnikova.el@bmstu.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Аннотация: Металлообрабатывающее производство относится к числу ключевых отраслей промышленности, обеспечивающих выпуск деталей и узлов для широкого спектра применений. Поэтому одним из главных факторов эффективности предприятий этой отрасли выступает высокий уровень качества выпускаемой продукции, которое напрямую зависит от состояния и надёжности технологической системы. Значит контроль качества выступает не только средством проверки соответствия изделий требованиям, но и инструментом оценки надёжности оборудования. В статье рассмотрена проблема обеспечения качества продукции машиностроения при эксплуатации оборудования со значитель-

ным сроком службы. Предложен метод контроля качества на основе мониторинга вибрации оборудования под нагрузкой, включающий формирование эталонной таблицы рациональных режимов обработки, оперативный критерий оценки качества и прогностическую модель. Показано, как на основе этих данных рассчитать прогнозный остаточный ресурс работоспособности оборудования и организовать систему технического обслуживания и ремонта (ТОиР) по технологической работоспособности.

Ключевые слова: качество продукции, вибродиагностика, технологическая работоспособность, эталонная таблица, остаточный ресурс, ТОиР.

Yarotskaya N.A.
Postgraduate Student
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
natali_yarockaya@mail.ru
Postnikova E.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Economics and Organization of Production
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
postnikova.el@bmstu.ru

QUALITY ASSURANCE OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS BASED ON EQUIPMENT MONITORING AND RESIDUAL RESOURCE FORECASTING

Abstact. Metalworking production is one of the key industries that supply parts and components for a wide range of applications. Hence, a high level of product quality – which directly depends on the condition and reliability of the technological system – is a major factor in the efficiency of enterprises in this industry. This means that quality control is not only a means of verifying product compliance with requirements but also a tool for assessing equipment reliability. The article considers the problem of ensuring product quality in mechanical engineering during the operation of equipment with a long service life. A quality control method based on monitoring equipment vibration under load is proposed, which includes the formation of a reference table of rational machining modes, an operational quality assessment criterion, and a predictive model. It is shown how, based on these data, the predicted residual operational life of equipment can be calculated and a maintenance and repair (M&R) system can be organized based on technological operability.

Keywords: product quality, vibration diagnostics, technological operability, reference table, residual life, maintenance and repair.

Современные машиностроительные предприятия, особенно в таких критически важных отраслях, как авиастроение, ракетно-космическая промышленность и автомобилестроение, функционируют в условиях жёстких требований к качеству выпускаемой продукции. Одновременно с этим большинство производственных систем сталкивается с проблемой прогрессирующего износа парка технологического оборудования [1]. Возникает противоречие: с одной стороны, допуски на геометрические параметры деталей в

ряде случаев составляют единицы микрометров, с другой - реальные возможности станков, имеющих значительный срок эксплуатации, постоянно снижаются.

Стоит отметить, что традиционные методы контроля качества - входной, операционный и приёмочный - ориентированы преимущественно на фиксацию соответствия готовых изделий заданным геометрическим параметрам и не отвечают за процесс обеспечения. Дополнительным осложнением, как показано в работах А.Г. Схиртладзе и В.М. Кована [2], является то, что параметры поверхностного слоя детали - остаточные напряжения, структурные изменения материала, микротрещины - остаются вне зоны оперативного контроля. Между тем именно эти параметры определяют эксплуатационные свойства ответственных деталей: усталостную прочность, износостойкость, коррозионную стойкость. Деталь может иметь идеальные геометрические размеры, но обладать недопустимо высокими растягивающими остаточными напряжениями, что приведет к ее разрушению в эксплуатации.

Также современные методы вибродиагностики, регламентированные ГОСТ 34479-2018 [3], позволяют с высокой точностью выявлять дефекты узлов оборудования на ранней стадии. Однако традиционная практика применения вибродиагностики на холостом ходу, в соответствии с ГОСТ ISO 230-1-2018 [4] не даёт ответа на вопрос, способен ли станок обеспечить требуемое качество обработки под нагрузкой. В результате служба качества фиксирует брак, а служба главного механика ремонтирует станки, но связь между качеством продукции и состоянием оборудования отсутствует. Как отмечает А.Д. Вольский [5], существует методологический разрыв: методы диагностики не транслируют свои данные в систему управления качеством и планирования.

Таким образом, актуальной задачей является разработка метода, объединяющего данные мониторинга технического состояния оборудования с задачами управления качеством продукции и организации технического обслуживания и ремонтов (ТОиР). В настоящей статье предлагается подход, основанный на контроле вибрации оборудования под нагрузкой, формировании эталонной таблицы рациональных режимов обработки для обеспечения изготовления деталей, соответствующих требованиям качества и прогнозировании остаточного ресурса работоспособности.

В соответствии с ГОСТ Р 27.102-2021 [6] работоспособным считается состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации. Развивая это определение применительно к задачам обеспечения качества, введём понятие *технологической работоспособности*

оборудования. Это его способность одновременно обеспечивать заданное качество продукции и требуемую производительность под нагрузкой. В

отличие от технической исправности, оцениваемой на холостом ходу, технологическая работоспособность может быть оценена только в процессе резания. Если хотя бы один из критериев (качество, производительность) не выполняется, оборудование следует считать неработоспособным.

Для практической реализации этого подхода необходимо установить количественные связи между режимами обработки, уровнем вибрации под нагрузкой и качеством поверхности. С этой целью разработан алгоритм экспериментального определения рациональных режимов обработки, то есть таких режимов, при которых обработанное изделие будет полностью соответствовать требованиям качества.

Рассматривается система «станок - приспособление - инструмент - заготовка - СОЖ» как единое целое. При этом материал и размер заготовки, характеристики режущего инструмента, СОЖ и приспособление принимаются неизменными. Проводится многократная обработка тестовых образцов при систематическом варьировании скорости резания *V*, подачи *S* и глубины резания *h*. По окончании каждой технологической операции оценивается качество полученной детали: контролируются геометрические параметры (отклонение от круглости, цилиндричности, прямолинейности), шероховатость поверхности, а также, с привлечением лабораторных методов - состояние поверхностного слоя (остаточные напряжения, структурные изменения, микротрещины). Одновременно в процессе обработки регистрируются уровни вибрации по трём осям, чтобы учесть все динамические составляющие резания [7].

В результате эксперимента для конкретной единицы оборудования формируется эталонная таблица рациональных режимов (Таблица). Она включает в себя информацию, которую можно было зафиксировать в процессе обработке: перечень режимов обработки (скорость V, подача S, глубина h), гарантирующих требуемое качество, соответствующие им эталонные уровни вибрации под нагрузкой, а также сведения о развитии дефектов узлов станка при работе на данных режимах.

Таблица

Фрагмент эталонной таблицы рациональных режимов для станка Haas VF-1

№	Скорость обработки V, м/мин	Подача S, мм/об	Глубина резания h, мм	Уровень вибрации a, мм/с	Время операции Топ, мин	Развитие дефектов	Показатели качества (Форма/ Размеры/ Поверхность), баллы
1	94,2	0,508	0,5	0,9	4,2	–	9/9/9
2	157,0	0,762	1,0	1,6	4,5	–	8/8/8
3	157,0	1,016	1,5	2,2	5,0	подшипник	5/5/5
4	219,8	1,016	1,5	3,1	5,0	подшипник, направляющие	2/2/2

Сформированная эталонная таблица становится основой для дальнейших разработок. Она позволяет перейти от качественного описания взаимосвязи «состояние оборудования - качество продукции» к количественным зависимостям, которые могут быть применены в системах мониторинга и производственного планирования [8].

На основе этой таблицы разработан метод оперативного контроля качества. Суть его заключается в сравнении текущего уровня вибрации станка под нагрузкой a_i с эталонным значением $a_{эт}$ для данного режима обработки. Для количественной оценки отклонений введён критерий [9]:

$$K_t = \frac{a_i}{a_{эт}} \quad (1)$$

Нормирование по эталонному уровню делает критерий универсальным для разных режимов. Для каждого режима по результатам эксперимента определяется пороговое значение критерия $K_{кр}$. Величина этого порога зависит от жёсткости конкретной технологической системы. Если во время обработки происходит превышение, то это свидетельствует о том, что качество обработки перестаёт соответствовать заданным требованиям. В этот момент система сигнализирует оператору о необходимости смены режима или автоматически инициирует остановку обработки.

Для прогнозирования момента утраты качества используется линейная прогностическая модель [9]. В процессе эксплуатации оборудования под нагрузкой происходит постепенная деградация его узлов: износ направляющих, подшипников, потеря жёсткости контактных соединений и др. Эти процессы приводят к монотонному росту уровня вибрации на характерных частотах дефектов. Анализ трендов позволяет построить аппроксимирующую зависимость:

$$a(t) = a_0 + \alpha \cdot t \quad (2)$$

где a_0 – начальный уровень вибрации после настройки станка (фиксируется в эталонной таблице), α – скорость деградации узлов станка, определяемая экспериментально, t – время наработки на данном режиме. Момент времени $t_{кр}$, когда $a(t)$ достигает критического значения $a_{кр} = K_{кр} \cdot a_{эт}$, определяет предельный срок работы на данном режиме до необходимости перехода на более щадящий.

Переход с одного рационального режима на другой возможен только до тех пор, пока в эталонной таблице есть более щадящие режимы. Рано или поздно оборудование достигает состояния, при котором даже самый низкоскоростной режим не обеспечивает заданного качества. Для определения этого момента разработана методика оценки прогнозного остаточного ресурса работоспособности оборудования.

На основе текущего уровня вибрации $a_{тек}$ из эталонной таблицы определяются режимы, доступные для эксплуатации. Режим считается доступным, если его эталонный уровень вибрации не превышает текущий уровень

станка: $a_{эт(i)} \leq a_{тек}$. Режимы упорядочиваются по возрастанию $a_{эт}$, что соответствует переходу от менее к более нагруженным режимам по мере ухудшения технического состояния.

Для первого доступного режима определяется фактическая наработка t_k. Относительный износ на этом режиме характеризуется коэффициентом:

$$k_{изн} = \frac{t_k}{T_{пред(k)}}, \quad (3)$$

где $T_{пред(k)}$ - предельная наработка на текущем режиме (максимальное время работы, по достижении которого уровень вибрации достигает порогового значения $a_{пор}$).

Прогнозируемый ресурс для каждого последующего режима $i > k$ составит:

$$T_{прог(i)} = T_{пред(i)}\left(1 - k_{прог}\right) \quad (4)$$

Полный остаточный ресурс станка до вывода в ремонт определяется суммированием остатка на текущем режиме и прогнозируемого ресурса на всех остальных доступных режимах:

$$T_{прог} = \left(T_{пред(k)} - t_k\right) + \sum_{i=k+1}^{N} \left(1 - k_{прог}\right) T_{пред(i)} \quad (5)$$

А прогнозируемый календарный срок до планового ремонта можно рассчитать с учётом среднемесячной загрузки станка $q_{мес}$:

$$D_{прог} = \frac{T_{прог}}{q_{мес}} \quad (6)$$

Полученные данные позволяют организовать систему ТОиР по фактическому техническому состоянию с учетом технологической работоспособности по критериям требования к параметрам качества и допустимого уровня производительности.

В соответствии с ГОСТ Р 71240-2024 «Станки металлорежущие. Организация технического обслуживания и ремонта станочного парка в формате «по техническому состоянию». Общие положения» [10], соавтором которого является один из авторов настоящей статьи, стандарт предусматривает проведение вибродиагностики как наиболее информативного метода безразборной диагностики. Однако ГОСТ устанавливает общие принципы, но не содержит конкретного методического аппарата для оценки остаточного ресурса работоспособности оборудования по критериям качества выпускаемой продукции. Предлагаемая методика восполняет этот пробел.

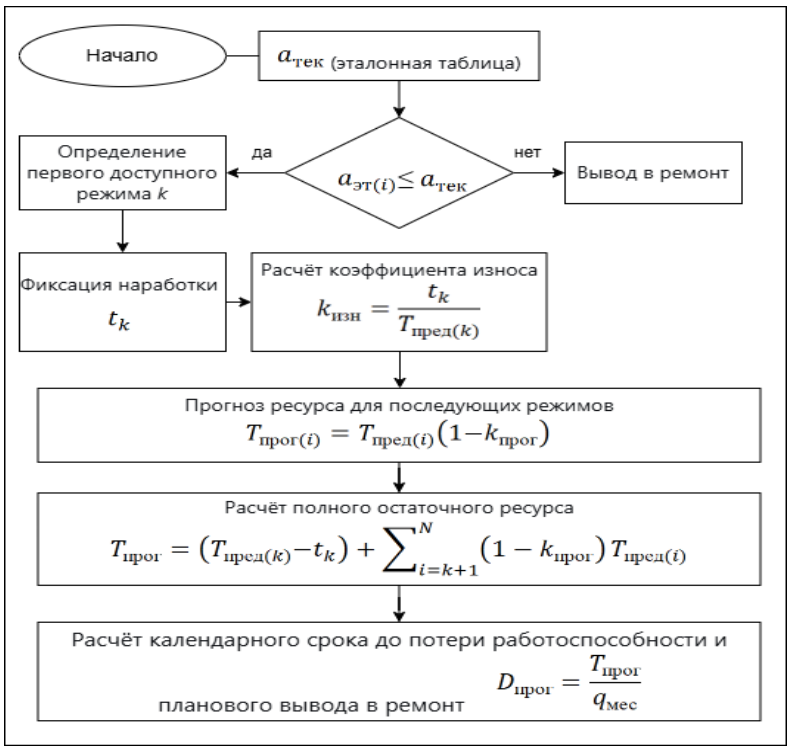


Рис. Алгоритм расчёта прогнозируемого остаточного ресурса работоспособности оборудования

Ключевое отличие предлагаемого подхода от традиционной практики ТОиР заключается в критерии вывода оборудования в ремонт. Традиционно решение о ремонте принимается либо по факту поломки (аварийный ремонт), либо по достижении предельного износа узлов согласно паспортным нормативам (планово-предупредительный ремонт). В предлагаемой методике критерием служит прогнозируемая утрата способности оборудования обеспечивать заданное качество продукции. Это позволяет выводить станок в ремонт не тогда, когда он уже сломался, выработал нормативный ресурс или стал неисправным, а в момент, когда дальнейшая эксплуатация на любом из доступных рациональных режимов перестаёт гарантировать качество.

Данный подход имеет ряд преимуществ.

Во-первых, диагностика даёт не просто сигнал «станок неисправен», а конкретный диагноз с указанием дефектного узла (подшипник, направляющие, зубчатая передача) и степени развития дефекта. На основе этого диагноза можно определить трудоёмкость ремонтных работ, перечень необходимых запасных частей и сроки их закупки.

Во-вторых, зная календарный срок до планового ремонта $D_{прог}$ для каждой единицы оборудования, станки можно ранжировать по степени их критичности и синхронизируя график ремонтов с производственной программой, планировать вывод оборудования в ремонт на периоды наименьшей загрузки или при наличии резервных мощностей.

В-третьих, данный подход минимизирует внеплановые простои и срывы производства, так как ремонт инициируется на основе прогноза, а не по факту отказа.

Таким образом, предлагаемая методика трансформирует традиционную стратегию ТОиР по техническому состоянию, добавляя в неё критерии качества и производительности. Это позволяет не только повысить точность планирования ремонтов, но и оказывать непосредственное влияние на качество выпускаемой продукции, снижая долю выпуска продукции, не отвечающей требованиям качества, а также повышать точность расчета производственной мощности предприятия. Разработанные алгоритмы могут быть интегрированы в MES-системы предприятия для автоматизации процессов мониторинга и планирования.

Предложенный метод обеспечивает переход от реактивного управления качеством (констатация брака после обработки) к проактивному, основанному на прогнозе технологических возможностей оборудования. Сформированная на основе экспериментальных данных эталонная таблица рациональных режимов устанавливает количественную взаимосвязь между режимами обработки, уровнем вибрации под нагрузкой и показателями качества. Критерий $K_t = a_i/a_{\text{эт}}$ позволяет в реальном времени выявлять риск возникновения выпуска продукции, не надлежащего качества, включая скрытые дефекты поверхностного слоя, которые не фиксируются при традиционном геометрическом контроле. А прогностическая модель $a(t) = a_0 + \alpha t$ дает возможность своевременно инициировать переход на более щадящий режим, обеспечивая сохранение качества при прогрессирующем износе.

Разработанная методика оценки остаточного ресурса и организации ТОиР по техническому состоянию с учетом технологической работоспособности позволяет выводить оборудование в ремонт на основе прогноза утраты способности обеспечивать заданное качество продукции, дополняя положения ГОСТ Р 71240-2024. Такой подход обеспечивает синхронизацию графиков ремонтов с производственной программой, минимизируя простои и затраты. В результате контроль качества из пассивной инспекционной процедуры превращается в активный инструмент управления производственным процессом.

Данное исследование было проведено в рамках работы
по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта
на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям
научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

Список литературы

1. Murthy D.N.P., Atrens A., Eccleston J.A. Strategic maintenance management // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2002. Vol. 8. No. 4. Pp. 287-305.

2. Схиртладзе А.Г., Кован В.М. Технологическое обеспечение и диагностика состояния металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 2018. 284 с.

3. ГОСТ 34479-2018. Вибрация. Контроль состояния оборудования. - Введ. 2019-07-01. М.: Стандартинформ, 2019.
4. ГОСТ ISO 230-1-2018. Испытания станков. Часть 1. Геометрическая точность станков, работающих на холостом ходу или в квазистатических условиях. - Введ. 2019-07-01. М.: Стандартинформ, 2018.
5. Вольский А.Д. Ограничения современных систем диагностики для задач производственного планирования // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020, № 3. С. 77–85.
6. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Испытания на надежность. Основные положения. - Введ. 2022-07-01. М.: Стандартинформ, 2021.
7. Куклин В.С. Динамика технологических систем в машиностроении. СПб.: Политехника, 2020, 198 с.
8. Постникова Е.С., Яроцкая Н.А. Особенности расчета производительности оборудования по критериям качества продукции // XV Всероссийская научная конференция по организации производства. XV Чарновские чтения. М., 2025. С. 442–454.
9. Яроцкая Н.А., Постникова Е.С., Васильев В.А., Александрова С.В. Управление качеством продукции на основе контроля качества исполнения рабочего процесса // Известия Самарского научного центра РАН. 2026. № 6. С. 45–59.
10. ГОСТ Р 71240-2024. Станки металлорежущие. Организация технического обслуживания и ремонта станочного парка в формате «по техническому состоянию». Общие положения. - Введ. 2024-03-01. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 28 с.

Наумов В.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
sir.vadimka45@yandex.ru

ОПЕРАЦИОННЫЕ РИСКИ РУЧНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЕРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И КРИТЕРИИ ПЕРЕХОДА К АВТОМАТИЗАЦИИ

Аннотация. В статье на примере аккредитованной метрологической лаборатории проведен системный анализ операционных рисков, возникающих при использовании ручных и табличных методов управления поверочной деятельностью. На основе статистической обработки записей выявлены количественные характеристики ошибок документирования, идентификации и расчета. Предложена формализованная система критериев (организационных, технических, экономических и нормативных) для обоснования перехода к автоматизированному управлению. Сформулированы требования к минимальному объему парка средств измерений и критической частоте ошибок, при которых автоматизация становится экономически и технологически обоснованной.

Ключевые слова: поверка средств измерений, операционные риски, человеческий фактор, автоматизация метрологической деятельности, критерии принятия решений, качество измерений, цифровая трансформация.

Naumov V.A.
Student
Moscow Polytechnic University

Russia, Moscow
sir.vadimka45@yandex.ru

OPERATIONAL RISKS OF MANUAL METHODS OF MANAGING VERIFICATION ACTIVITIES AND CRITERIA FOR THE TRANSITION TO AUTOMATION

Abstract. The article provides a systematic analysis of operational risks arising from the use of manual and tabular methods of managing verification activities using the example of an accredited metrological laboratory. Based on statistical processing of records, quantitative characteristics of errors in documentation, identification, and calculation have been identified. A formalized system of criteria (organizational, technical, economic, and regulatory) has been proposed to justify the transition to automated management. Requirements are formulated for the minimum volume of the fleet of measuring instruments and the critical frequency of errors, at which automation becomes economically and technologically justified.

Keywords: calibration of measuring instruments, operational risks, human factor, automation of metrological activities, decision-making criteria, measurement quality, digital transformation.

В современной метрологической практике сохраняется устойчивый разрыв между технологическими возможностями эталонного оборудования и организационной эффективностью процессов управления поверочной деятельностью. Как показывает анализ деятельности аккредитованных лабораторий, наличие калибраторов с погрешностью 0,005% и квалифицированного персонала не гарантирует достоверность итогового заключения о пригодности средства измерений (СИ), если процессы регистрации, документирования и расчета остаются на «ручном» уровне [1, 2].

Данное противоречие обусловлено тем, что метрологические риски традиционно рассматриваются через призму инструментальной погрешности, тогда как операционные риски, связанные с человеческим фактором и несовершенством административных процедур, часто остаются за рамками системного анализа. Между тем, как показывает практика, именно эти риски вносят доминирующий вклад в итоговую неопределенность результата поверки при работе с большими массивами СИ.

Целью настоящего исследования является количественная оценка операционных рисков, характерных для ручных и табличных методов управления поверочной деятельностью, а также разработка формализованной системы критериев, позволяющих обоснованно принимать решение о переходе к автоматизированным методам управления.

Исследование проводилось на базе аккредитованной метрологической лаборатории, осуществляющей поверку электроизмерительных, радиоизмерительных и теплотехнических средств измерений. Штат лаборатории включает трех аттестованных метрологов. Ежемесячный объем поверок составляет от 150 до 250 единиц СИ.

Методика исследования включала следующие этапы:

1. Сплошная выборочная проверка 700 записей журналов поверки за период 12 месяцев.

2. Классификация и кодирование выявленных ошибок по типам.

3. Оценка временных затрат на выполнение административных операций методом хронометража (50 замеров).

4. Анкетирование метрологов для выявления субъективных факторов, влияющих на частоту ошибок.

5. Построение модели интегрального риска недостоверного результата поверки.

Количественный анализ операционных рисков

В результате обработки 700 учетных записей выявлены следующие категории операционных ошибок (таблица 1).

Таблица 1

Распределение операционных ошибок по категориям

Категория ошибки	Тип проявления	Количество случаев	Доля от выборки,%
Ошибки идентификации	Неверный серийный номер СИ	32	4,57
	Ошибка в наименовании типа СИ	11	1,57
	Дублирование номеров записей	15	2,14
Пропуск обязательных реквизитов	Отсутствие ФИО поверителя	45	6,43
	Отсутствие подписи (в электронном журнале)	28	4,00
	Отсутствие даты поверки	6	0,86
Ошибки расчета	Неверный расчет даты следующей поверки	выборочно 5%	5,00
Форматные ошибки	Неструктурированный ввод условий поверки	700	100,00

Зависимость частоты ошибок от утомляемости оператора

Анализ распределения ошибок по времени рабочей смены выявил статистически значимую корреляцию (коэффициент корреляции Пирсона r = 0,73) между частотой ошибок и временем, прошедшим с начала работы (Рисунок).

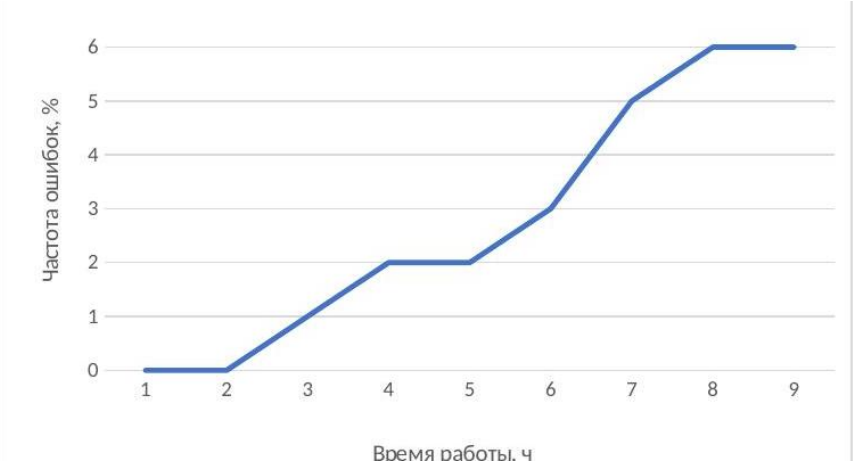


Рис. Зависимость частоты ошибок документирования от продолжительности работы (аппроксимация по 100 замерам)

Наиболее интенсивный рост ошибок наблюдается после 4-го часа непрерывной работы (с 2% до 5,8% к концу 7-го часа). Это соответствует известным психофизиологическим закономерностям снижения внимания при выполнении монотонных операций [3].

Временные затраты как скрытый риск

Хронометраж операций показал, что на административное сопровождение одной поверки (регистрация, оформление протокола, расчет даты, архивирование) при ручном методе затрачивается в среднем 18,5 минут. При этом структура затрат распределяется следующим образом (таблица 2).

Таблица 2

Структура временных затрат на административное сопровождение поверки

Операция	Среднее время, мин	Доля от общих затрат,%	Риск при сокращении времени
Ввод идентификационных данных	4,2	22,7	Рост ошибок в серийных номерах
Заполнение протокола результатами	6,8	36,8	Пропуск значений, опечатки
Расчет даты следующей поверки	1,5	8,1	Арифметические ошибки
Формирование свидетельства	3,2	17,3	Несоответствие шаблону
Проверка и корректировка	2,8	15,1	Пропуск ошибок при утомлении

Важно отметить, что при попытке ускорить работу (например, при сдаче срочной отчетности или в конце месяца) частота ошибок возрастает в 2–2,5 раза. Это создает классическую дилемму операционной деятельности: «скорость или качество».

Модель интегрального риска недостоверного результата поверки

Под недостоверным результатом поверки понимается ситуация, при которой итоговое заключение о пригодности (или непригодности) СИ не соответствует его фактическому метрологическому состоянию. При ручном методе такой риск может возникнуть вследствие:

1. **Ошибки идентификации** (вероятность 0,046) – поверяется не тот прибор или результаты записаны в карточку другого СИ.
2. **Ошибки измерений при ручном считывании** (вероятность 0,03–0,05 в зависимости от типа прибора) [4].
3. **Арифметической ошибки при расчете погрешности** (вероятность 0,02–0,03).
4. **Ошибки документирования** (вероятность 0,168 для хотя бы одной ошибки в записи, но не все ошибки ведут к неверному заключению).

Интегральная вероятность недостоверного результата (при допущении о частичной независимости событий) оценивается в диапазоне **8–15%** для сложных многоточечных поверок. Это означает, что в среднем каждая 7–12-я поверка, оформленная ручным методом, может содержать критическую ошибку, влияющую на заключение.

Критерии обоснования перехода к автоматизации

На основе выявленных количественных характеристик операционных рисков предложена система критериев для принятия решения о переходе от ручных/табличных методов к автоматизированному управлению поверочной деятельностью.

Экономические критерии

Расчет экономической целесообразности автоматизации базируется на сравнении текущих затрат (C_current) и прогнозируемых затрат после внедрения (C_auto). Переход целесообразен при выполнении неравенства:

$$C_auto + I/T < C_current \quad (1)$$

где C_current – текущие годовые затраты на административные операции и устранение ошибок;

C_auto – годовые эксплуатационные затраты АСУ;

I – единовременные инвестиции во внедрение;

T – горизонт планирования (рекомендуется 3 года).

Нормативные критерии

Переход к автоматизированному управлению становится не просто целесообразным, а необходимым при наличии следующих нормативных требований:

- Обязательное ведение электронных журналов в соответствии с требованиями аккредитующего органа;
- Требование к прослеживаемости измерений по ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [5] (ручные журналы не обеспечивают требуемого уровня защиты от несанкционированных изменений);
- Необходимость оперативного предоставления отчетности в контролирующие органы в машиночитаемых форматах.

Формализованная процедура принятия решения

На основе предложенных критериев разработана формализованная процедура принятия решения о переходе к автоматизации, представлена таблица 3.

Таблица 3

Критерии принятия решения о переходе к автоматизации

Критерий	Значение	Вывод по анализу
Оценка объема поверки СИ	> 50 единиц в месяц (или > 500 единиц в парке)	Поток достаточен для окупаемости автоматизации; переход экономически и организационно оправдан → переход к следующему критерию (оценка ошибок).
	≤ 50 единиц в месяц (и ≤ 500 единиц в парке)	Объем поверок мал; автоматизация не даст значимого эффекта; целесообразно сохранить ручные / табличные методы.
Оценка частоты ошибок документирования	> 5% (или интегральный риск >8–10%)	Ошибки превышают допустимый уровень; ручные методы создают неприемлемые операционные риски → требуется переход к автоматизации (при наличии экономической эффективности).
	≤ 5%	Уровень ошибок приемлем; автоматизация по данному критерию не обязательна, но может быть рассмотрена при росте объема или усложнении требований (нормативы, отчетность).
Оценка экономической эффективности	C_auto + I/T < C_current	Автоматизация экономически обоснована (снижает текущие затраты на администрирование и исправление ошибок) → решение: переходить к автоматизации.
	C_auto + I/T ≥ C_current	Прямая экономия отсутствует или затраты не окупаются за горизонт планирования (3 года) → переход нецелесообразен без нормативных требований (обязательный электронный журнал, требование 17025).

Практические рекомендации по минимизации рисков на этапе перехода

Для лабораторий, принявших решение о переходе к автоматизированному управлению, сформулированы следующие практические рекомендации, основанные на анализе типовых ошибок внедрения [6–8]:

1. **Параллельный режим работы** – в течение первых 4–6 недель после внедрения АСУ следует вести параллельное дублирование записей в старой и новой системе для верификации корректности работы алгоритмов.

2. **Поэтапное расширение функционала** – начинать с модуля документооборота, затем подключать планирование, и только после стабилизации – интеграцию с измерительным оборудованием.

3. **Обучение персонала** – не менее 16 академических часов практических занятий с тестированием. Наиболее частой причиной отказов от АСУ является не техническое несовершенство, а неприятие системы персоналом [7].

4. **Формализация процедур исправления ошибок** – должна быть предусмотрена процедура внесения исправлений в электронные документы с обязательным сохранением истории изменений (в соответствии с требованиями прослеживаемости).

5. **Регулярный аудит качества данных** – не реже одного раза в квартал следует проводить выборочную сверку электронных записей с первичными документами (при их наличии) для контроля достоверности.

Проведенное исследование позволило получить следующие основные результаты:

1. Выполнена количественная оценка операционных рисков, характерных для ручных и табличных методов управления поверочной деятельностью. Показано, что около 16,8% учетных записей содержат хотя бы одну ошибку идентификации, пропуск реквизита или расчетную погрешность. Интегральная вероятность недостоверного результата поверки оценивается в диапазоне 8–15%.

2. Установлена статистически значимая корреляция между частотой ошибок документирования и продолжительностью рабочей смены (коэффициент корреляции $r = 0,73$), что подтверждает влияние утомляемости оператора на качество работы.

3. Предложена система критериев (организационных, технических, экономических и нормативных) для обоснования перехода к автоматизированному управлению поверочной деятельностью. Пороговыми значениями являются: объем парка СИ более 500 единиц, частота поверок более 50 единиц в месяц, уровень ошибок документирования более 5%.

4. Разработан формализованный алгоритм принятия решения, учитывающий последовательную проверку организационных, экономических и технических условий.

5. Сформулированы практические рекомендации по минимизации рисков на этапе перехода к автоматизации, включая параллельный режим работы, поэтапное расширение функционала и обязательное обучение персонала.

Полученные результаты могут быть использованы руководителями метрологических лабораторий для обоснования инвестиций в автоматизацию, а также для планирования мероприятий по снижению операционных рисков на этапе переходного периода.

Список литературы

1. Егоров М.Ю., Антипина А.В., Демидова Н.Б., Макарова М.В., Прошкин С.С., Рыжова Е.Л., Шарая О.А. Применение автоматизированных систем с целью повышения качества метрологического обеспечения средств измерений // Информация и инновации. – 2024. – № 9 (117). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-avtomatizirovannyh-sistem-s-tselyu-povysheniya-kachestva-metrologicheskogo-obespecheniya-sredstv-izmereniy (дата обращения: 12.04.2026).
2. Гордеева Г.В., Бекасов Е.В., Банников С.А. Внутренние аудиты метрологических служб: перспективы автоматизации // Компетентность. – 2024. – № 9–10, – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnutrennie-audity-metrologicheskih-sluzhb-perspektivy-avtomatizatsii (дата обращения: 12.04.2026).
3. Романычева К.С., Спиридонов Д.М. Типовые риски и возможности процесса поверки средств измерений // Физика. Технологии. Инновации: сборник статей VII Международной молодежной научной конференции (Екатеринбург, 18–22 мая 2020 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2020, – С. 260–267.
4. Алексеева М., Грибов В., Богданова Н. Влияние поверки и калибровки средств измерения на качество продукции // Роль технического регулирования и стандартизации в эпоху цифровой экономики: сборник статей V Международной научно-практической конференции молодых ученых (Екатеринбург, 2 ноября 2023 г.). – Екатеринбург: Издательский дом «Ажур», 2023. – С. 374–379.
5. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2021.
6. Сулаберидзе В.Ш., Чуновкина А.Г., Пронин А.Н., Неклюдова А.А., Томский К.А. Тенденции развития метрологического обеспечения измерительных систем с учетом усложнения их функциональности // Эталоны. Стандартные образцы. – 2025. – Т. 21, № 4. – С. 124–138. DOI: 10,20915/2077-1177-2025-21-4-124-138.
7. Кондратьев А., Овчинников А. Действовать на автомате: автоматизация поверки и калибровки осциллографов // Официальный сайт ГК «Диполь». – 2025. – URL: https://rigol-rus.com/knowledgebase/articles/deystvovat-na-avtomate/ (дата обращения: 12.04.2026).
8. Manual vs. Automated Calibration Systems: ROI Analysis // Patsnap Eureka. – 2025. – URL: https://eureka.patsnap.com/article/manual-calibration-vs-automated-calibration-systems-roi-analysis (дата обращения: 12.04.2026).
9. Захаров В.А., Волегов А.С. Метрологическое обеспечение измерительных систем: учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. – 168 с.

Имангулова А.И.
студент
НИТУ МИСИС
Россия, Москва
alimangulova@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СЕРТИФИКАЦИИ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА АДДИТИВНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Аннотация. Объектом исследования является роль Системы менеджмента качества по ГОСТ ISO 13485-2017, как фундаментального условия для производства и государственной регистрации аддитивных медицинских изделий. Цель работы – оптимизация процесса сертификации Систем менеджмента качества производства медицинских изделий с применением аддитивных технологий, в рамках делопроизводства. В работе рассматриваются общие вопросы аддитивного производства медицинских изделий и важность внедрения и поддержания Системы менеджмента качества по стандарту ГОСТ ISO 13485-2017. Существенное внимание уделено оптимизации процесса сертификации в рамках написания отчетной документации. В результате исследования был предложен метод оптимизации процесса написания отчетной документации по сертификации и поэтапный план его реализации.

Ключевые слова: аддитивные технологии, медицинские изделия, имплантаты, сертификация, Система менеджмента качества, орган по сертификации, оптимизация.

Imangulova A.I.
Student
NUST MISIS
Russia, Moscow
alimangulova@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE CERTIFICATION PROCESS OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS FOR ADDITIVE MEDICAL DEVICES

Abstract. The object of the research is the role of the Quality Management System according to GOST ISO 13485-2017 as a fundamental condition for the production and state registration of additive medical devices. The purpose of the work is to optimize the certification process of Quality management Systems for the production of medical devices using additive technologies, within the framework of office work. The paper discusses general issues of additive manufacturing of medical devices and the importance of implementing and maintaining a quality management System according to GOST ISO 13485-2017. Considerable attention is paid to optimizing the certification process as part of writing accounting documentation. As a result of the research, a method was proposed to optimize the process of writing accounting documentation for certification and a step-by-step plan for its implementation.

Keywords: additive technologies, medical devices, implants, certification, Quality management system, certification body, optimization.

В настоящее время, аддитивные технологии, также известные как 3D-печать, совершили революцию в российской медицине, открыв возможности для создания персонализированных медицинских изделий, в числе которых: индивидуальные протезы, имплантаты, хирургические шаблоны и ортопедические конструкции. В отличие от традиционных субтрактивных методов, таких как фрезерование и токарная обработка, аддитивные технологии позволяют создавать изделия сложной геометрической формы, идеально адаптированные под анатомию конкретного пациента.

В то же время, внедрение данных технологий в серийное или заказное производство несет в себе специфические риски, связанные с безопасностью и качеством продукции, например, анизотропию свойств материала, риски загрязнения порошкового сырья и сложность очистки пористых структур. Для минимизации таких рисков и обеспечения безопасности и качества производимой продукции, производители обязаны внедрять и поддерживать функционирование Системы менеджмента качества (СМК), соответствующей международному стандарту ГОСТ ISO 13485-2017.

Наиболее распространенными методами для производства имплантируемых изделий являются SLM (Selective Laser Melting) – селективное лазерное плавление и EBM (Electron Beam Melting) – электронно-лучевая плавка [6].

Принципы действия данных методов схожи. Тонкий слой металлического порошка (толщиной 20–60 мкм) распределяется по платформе построения, после чего лазерный луч или пучок электронов расплавляет материал в точках, соответствующих сечению будущей детали.

Процесс характеризуется высокими температурными градиентами, что может привести к возникновению остаточных внутренних напряжений. Без должного контроля это может вызвать коробление имплантата или образование микротрещин еще до этапа эксплуатации [5].

В аддитивном производстве имплантируемых изделий используются материалы, обладающие высокой биоинертностью и коррозионной стойкостью. Данные вещества зачастую не отторгаются организмом, обеспечивая их интеграцию с тканями. Выбор биосовместимого материала зависит от клинической ситуации, требований к прочности, эстетике и индивидуальных особенностей пациента.

Одной из главных проблем традиционных металлических имплантатов является несоответствие их жесткости свойствам костной ткани.

Аддитивное производство медицинских изделий снимает геометрические ограничения, присущие традиционным субтрактивным методам (фрезерованию, точению) и литью. Это позволяет реализовывать принципы биомиметики – инженерного копирования природных структур, что критически важно для долгосрочной выживаемости имплантатов.

Модуль Юнга (показатель жесткости) титанового сплава Ti-6Al-4V составляет около 110 ГПа, тогда как у кортикальной (плотной) кости человека он варьируется в пределах 15–20 ГПа, а у губчатой – менее 3 ГПа.

Согласно закону Вольфа, кость перестраивается в ответ на нагрузку. Если имплантат слишком жесткий, он забирает на себя всю механическую нагрузку («экранирует» кость). Костная ткань, переставшая испытывать напряжение, начинает атрофироваться. Это явление называется Stress Shielding Effect и часто приводит к асептическому расшатыванию эндопротеза через 5–10 лет [7].

Аддитивные технологии позволяют создавать изделия не сплошного сечения, а состоящие из решетчатых структур (lattice structures). Изменяя толщину перемычек и тип ячейки, инженеры могут снизить эффективный модуль упругости металлического изделия до значений 10–20 ГПа, сделав его изоэластичным кости. Это обеспечивает правильную передачу нагрузки и сохраняет здоровье костной ткани.

Использование программного обеспечения для топологической оптимизации (Generative Design) позволяет рассчитать, где именно в детали нужен материал для восприятия нагрузок, а где его можно убрать. Это позволяет снизить вес крупных имплантатов (например, при замене тазовых костей или частей черепа) на 40–60%. Снижение веса уменьшает инерционные нагрузки при движении и снижает риск усталости окружающих мягких тканей, что ускоряет реабилитацию пациента.

Традиционные имплантаты также полагаются на нанесение пористых покрытий (напыление), которые могут отслаиваться. 3D-печать в свою очередь позволяет создавать объемную пористость, являющуюся единым целым с телом имплантата. Исследования показывают, что для прорастания костной ткани и сосудов (васкуляризации) идеальный размер пор составляет 300–600 мкм.

Шероховатая поверхность, получаемая при спекании порошка (с параметром Ra 5–10 мкм), служит хорошим субстратом для адгезии остеобластов (клеток, строящих кость). Решетчатая структура позволяет кости прорастать сквозь имплантат, создавая «биологический замок» и обеспечивая сверхпрочную вторичную фиксацию.

Важнейшим аспектом для производителя медицинских изделий является не только добровольная сертификация, но и выполнение обязательных государственных требований. В Российской Федерации (и в рамках ЕАЭС) наличие функционирующей Системы менеджмента качества (СМК) является обязательным условием для государственной регистрации большинства классов медицинских изделий, особенно имплантируемых. Регулирующий орган (Росздравнадзор) требует доказательств, что производитель способен стабильно выпускать безопасную продукцию. Сертификат ГОСТ ISO 13485 служит подтверждением того, что все процессы – от закупки титанового порошка до упаковки готового имплантата – находятся под контролем.

Для получения Регистрационного удостоверения (РУ) производитель должен успешно пройти процедуру инспектирования производства (для

отечественных производителей) или инспектирования системы менеджмента качества (для зарубежных). Требования к этому инспектированию гармонизированы со стандартом ГОСТ ISO 13485-2017 [3].

Для имплантируемых изделий, созданных с помощью аддитивных технологий, критически важными, среди прочих, становятся следующие аспекты стандарта:

1 Управление рисками (Раздел 7.1)

Производитель должен документировать процессы управления рисками на всех этапах жизненного цикла.

В 3D-печати риски могут скрываться в качестве исходного сырья (порошка), сбоях программного обеспечения или ошибках постобработки. Напечатанные изделия могут иметь разные механические свойства в зависимости от направления печати (ось Z обычно наименее прочная). Если имплантат будет ориентирован в камере принтера неправильно, он может сломаться под нагрузкой в теле пациента. Это риск, который должен быть учтен на этапе проектирования [2].

2 Прослеживаемость (Раздел 7.5.8)

Для имплантируемых изделий, организация обязана вести записи, позволяющие проследить историю каждой партии сырья и каждого напечатанного изделия. Стандарт требует обеспечения качества на этапе проектирования и производства, что особенно актуально для изделий, изготавливаемых в единственном экземпляре.

На практике каждому имплантату может присваиваться уникальный UDI-код, который связывает его с конкретной партией порошка, файлом задания на печать и протоколами термообработки.

3 Валидация процесса печати (Пункт 7.5.6)

Валидация – это процесс проверки соответствия данных, процессов, моделей или продуктов установленным требованиям, стандартам и критериям качества.

Согласно ГОСТ ISO 13485-2017, организация должна валидировать любые процессы производства и обслуживания, результаты которых нельзя проверить посредством последовательного мониторинга или измерения и, следовательно, недостатки которых становятся очевидными только после начала использования продукции или ее обслуживания.

Поскольку нельзя разрушить напечатанный индивидуальный протез для проверки его внутренней структуры, необходимо валидировать сам процесс.

Installation Qualification (IQ): Подтверждение, что 3D-принтер установлен согласно требованиям (электроснабжение, инертная среда, влажность в помещении).

Operational Qualification (OQ): Подтверждение, что принтер работает в заданных диапазонах (мощность лазера, скорость сканирования).

Performance Qualification (PQ): Подтверждение стабильности качества продукции. В АТ для этого используются образцы-свидетели (test coupons)

– тестовые бруски, которые печатаются в той же камере, что и имплантат, и подвергаются разрушающему контролю (тесты на разрыв, микроструктурный анализ).

4 Контроль порошкового материала (Пункт 7.4)

В порошковой 3D-печати часто используется рециклинг (повторное применение) неспеченного порошка.

При каждом цикле печати порошок нагревается, но не плавится. Титан при нагреве активно поглощает кислород и азот из атмосферы камеры. Превышение порога содержания кислорода (обычно>0,2%) приводит к охрупчиванию металла. Также меняется сферичность гранул, что ухудшает текучесть порошка.

При таком виде производства необходимо придерживаться строгих регламентов смешивания «старого» и «нового» порошка, проводить регулярный химический анализ и гранулометрию.

5 Очистка и стерильность пористых структур (Пункт 6.4, 7.5.2)

Медицинские изделия, особенно имплантаты с пористой структурой для врастания кости, крайне сложны в очистке. Частицы неспеченного порошка могут застрять в глубине ячеистой структуры. При попадании в организм они могут вызвать металлоз или воспаление.

Процессы очистки (ультразвуковая мойка, химическое травление) должны быть валидированы. Часто требуется проведение тестов на цитотоксичность и остаточный биобарден (биологическую нагрузку), согласно серии стандартов ISO 10993.

6 Валидация программного обеспечения (Раздел 7.3)

Процесс производства имплантируемых медицинских изделий начинается с обработки КТ/МРТ данных и создания CAD-модели. ПО рассматривается как инструмент производства и подлежит обязательной валидации. Ошибки при конвертации форматов (DICOM -> STL -> G-code) могут привести к геомерическому несоответствию имплантата костному ложу пациента [1].

Согласно законодательству РФ (Постановление Правительства № 1416) и нормам ЕАЭС (Решение Совета ЕЭК № 106), медицинские изделия подлежат обязательной государственной регистрации. Для изделий с потенциально высоким риском применения (классы 2а стерильно и выше), к которым относится большинство аддитивных имплантов, наличие функционирующей СМК является обязательным требованием [4].

Орган по сертификации (ОС) в этой структуре выступает как независимая третья сторона, выполняющая функцию «фильтра» и гаранта качества перед государственным регулятором (Росздравнадзором). Цепочка взаимодействия выглядит следующим образом:

Производитель (АТ-производство): разрабатывает техническую документацию, валидирует процессы 3D-печати и внедряет СМК.

Орган по сертификации: проводит аудит, подтверждая, что производство действительно управляется, риски (например, смешение порошков или

непроплавление слоев) контролируются, а продукция прослеживаема от партии сырья до конкретного пациента.

Росздравнадзор: принимает сертификат соответствия ГОСТ ISO 13485 в составе регистрационного досье. Без этого сертификата (или отчета об инспектировании производства) получение РУ для серийного выпуска имплантов невозможно.

Таким образом, деятельность ОС является критическим этапом легитимизации аддитивного производства. Ошибки в работе ОС или затягивание процессов сертификации напрямую блокируют выход инновационной медицинской продукции на рынок.

Для обеспечения прозрачности, воспроизводимости и управляемости процессов оценки соответствия в рамках данного исследования применено моделирование в нотации BPMN 2.0 (Business Process Model and Notation). Это позволяет четко разграничить зоны ответственности между участниками процесса (Заказчиком, Комиссией ОС, Руководителем ОС) и визуализировать логику принятия решений [8].

Процесс первичной сертификации является наиболее трудоемким и ответственным. На основе разработанной графической модели (рис. 1), данный процесс декомпозируется на следующие подпроцессы.

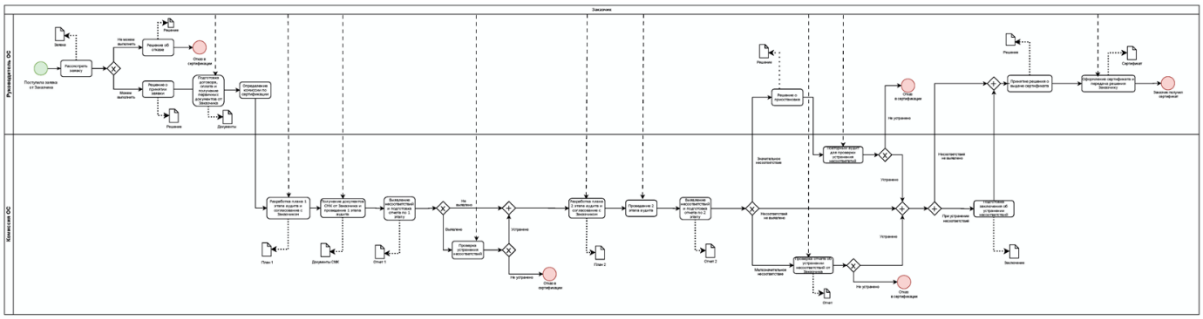


Рис. 1. Схема процесса сертификации

1. Этап инициации и анализа заявки:

Процесс стартует с подачи заявки Заказчиком.

Критическая точка: Руководитель ОС проводит анализ заявки на предмет компетентности (наличие кодов IAF/EAЭС, соответствующих аддитивному производству). Если ОС не обладает необходимыми компетенциями, выносится решение об отказе.

При положительном решении заключается договор, назначается комиссия экспертов, обладающих знаниями в области специфики производства медицинских изделий.

2. Первый этап аудита (Анализ документации):

Цель этапа – проверка готовности СМК к сертификации.

Комиссия запрашивает пакет документов (Руководство по качеству, документированные процедуры, записи о валидации ПО для 3D-моделирования и оборудования).

Результат: Формируется отчет по 1 этапу. Если выявлены критические пробелы, Заказчик должен их устранить до начала выездной проверки.

3. Второй этап аудита (Выездная проверка):

Осуществляется непосредственно на производственной площадке (Gemba).

Эксперты проверяют соответствие реальных процессов описанным процедурам: условия хранения порошков, калибровку 3D-принтеров, контроль параметров среды (температура, влажность), процессы стерилизации (если применимо).

В ходе аудита могут быть выявлены несоответствия двух типов:

Значительные: напрямую влияют на безопасность изделий (например, отсутствие контроля партии сырья). Требуют повторного аудита.

Малозначительные: единичные случаи (например, ошибка в журнале). Устраняются корректирующими действиями без повторного выезда.

4. Принятие решения и выдача сертификата:

Только после закрытия всех несоответствий и верификации отчета об устранении, Руководитель ОС принимает «Решение о выдаче сертификата». Сертификат выдается сроком на 3 года.

Сертификация не является разовым актом. Для подтверждения стабильности качества проводится ежегодный инспекционный контроль. Согласно модели (рис. 2), процесс имеет свои особенности.

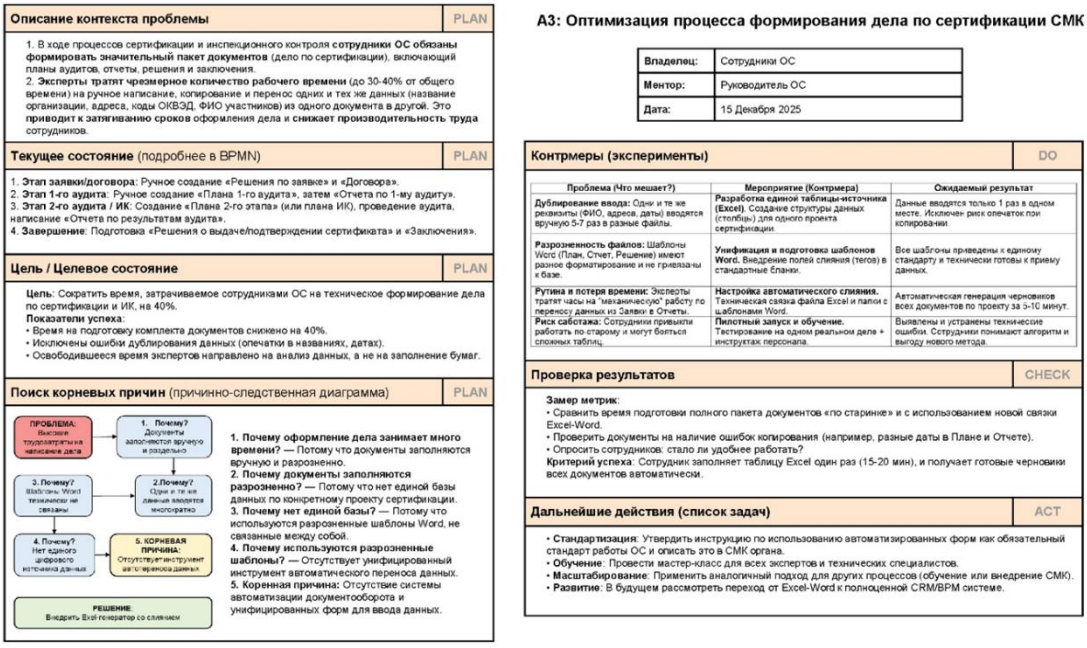


Рис. 2. Схема процесса инспекционного контроля

1. Планирование и инициирование:

ОС проактивно направляет извещение Заказчику о приближении срока ИК. Отказ от прохождения ИК ведет к автоматической отмене сертификата.

Запрашивается информация о любых изменениях в технологии (например, смена типа 3D-принтера или поставщика материала), так как это требует особого внимания аудиторов.

2. Проведение аудита и градация решений:

Процесс аудита аналогичен 2-му этапу сертификации, но проводится в меньшем объеме.

Ветвление процесса при выявлении несоответствий:

Если выявлены значительные несоответствия, и они не устранены в срок, сертификат не просто аннулируется, а его действие приостанавливается. Заказчику дается время на исправление ситуации.

Если по истечении срока приостановки (обычно до 6 месяцев) несоответствия не устранены, принимается «Решение об отмене сертификата».

Данная BPMN-модель демонстрирует цикличность контроля, что гарантирует потребителю (пациенту и врачу), что качество аддитивных изделий поддерживается на должном уровне постоянно, а не только в момент получения документов.

В условиях растущего рынка аддитивных технологий нагрузка на Органы по сертификации возрастает. Анализ внутренней эффективности ОС показал, что «узким местом» является процесс документального оформления результатов оценки соответствия («Написание дела»).

Для расшивки этого процесса применен Метод А3 – инструмент Lean-менеджмента (Бережливого производства), позволяющий структурированно решить проблему (рис. 3).

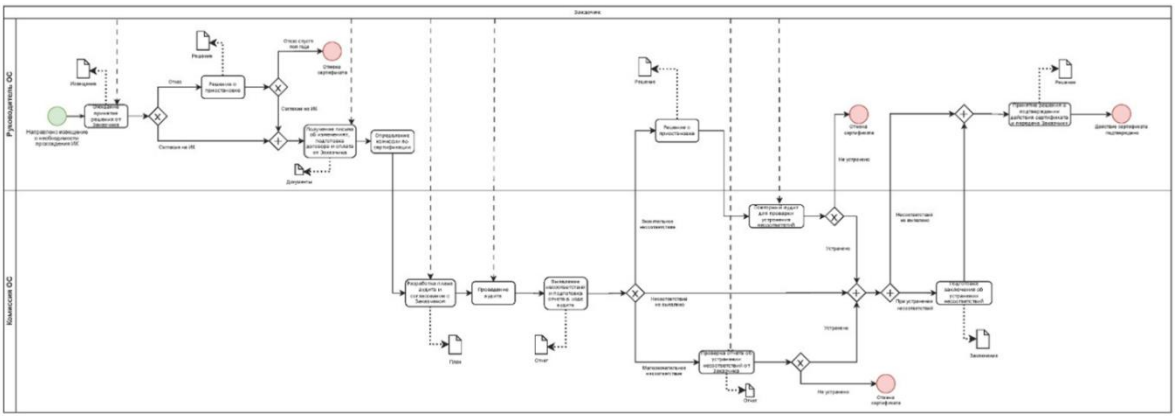


Рис. 3. Модель улучшения процесса с применением метода А3

Этап 1: PLAN (Определение проблемы и анализ причин)

Контекст:

Дело по сертификации представляет собой совокупность юридически значимых документов (планы, отчеты, акты, решения), которые должны быть безупречны с точки зрения оформления, так как могут быть запрошены регулятором или судом.

Проблематика:

Эксперты тратят 30–40% рабочего времени на техническую верстку документов.

Высокий риск «человеческого фактора»: ошибки при ручном переносе реквизитов (ИНН, адрес, ФИО, область сертификации) из заявки в отчет, из отчета в сертификат.

Разрозненность шаблонов Word приводит к тому, что одно и то же изменение (например, смена юридического адреса завода) нужно вносить вручную в 10–15 разных файлов.

Коренная причина:

Отсутствие единой информационной среды. Данные хранятся в неструктурированном виде (в разных файлах), и процесс их обработки полностью ручной.

Этап 2: DO (Разработка и внедрение контрмер)

В качестве решения предложена автоматизация генерации документов на базе офисных приложений (связка Excel + Word), не требующая дорогостоящего ПО. Суть предлагаемого метода:

Создание Базы Данных (БД):

Разрабатывается единый реестр в Excel («Реестр проектов»), где одна строка соответствует одному проекту по сертификации. В эту строку один раз вносятся все переменные данные: Название компании, ФИО директора, даты аудита, состав комиссии, область применения СМК и т.д.

Унификация шаблонов:

Все бланки ОС (План аудита, Отчет, Листы несоответствий, Решения) перерабатываются. Вместо фиксированного текста в места переменных данных вставляются поля слияния (Tags/Placeholders).

Автоматическое слияние:

С помощью функции рассылки (Mail Merge) данные из Excel автоматически «раскидываются» по всем шаблонам.

Этап 3: CHECK (Проверка результатов)

Временной ресурс:

Время на создание черновика полного комплекта документов («Дела») сокращается с 3–4 часов до 15–20 минут.

Качество:

Риск опечаток в реквизитах сводится к нулю (если данные верны в Excel, они верны во всех 15 документах).

Фокус внимания:

Эксперт переключает внимание с форматирования текста на анализ содержания (суть выявленных несоответствий, оценка рисков производства).

Этап 4: ACT (Стандартизация и масштабирование)

Финальный этап метода А3 предполагает закрепление успеха. Новая процедура «формирования дела» утверждается в качестве стандарта организации (СТО) внутри Органа по сертификации. Проводится обучение персонала. В дальнейшем этот метод может быть масштабирован на другие

процессы, например, на оформление договоров или коммерческих предложений.

Используя процессный подход и нотацию BPMN, были детально описаны механизмы сертификации и инспекционного контроля, обеспечивающие барьер для некачественной продукции. Предложенное решение по оптимизации внутренней деятельности ОС (Метод А3) позволяет повысить производительность труда экспертов, высвобождая ресурсы для более тщательного аудита сложных технологических процессов 3D-печати, что в конечном итоге способствует повышению безопасности медицинских изделий на рынке.

Резюмируя, безопасность пациента зависит от симбиоза передовых инженерных решений, строгой дисциплины качества на производстве и профессиональной, оперативной работы органов по сертификации. Только в этой связке инновационные технологии могут стать стандартной, безопасной и доступной медицинской практикой.

Список литературы

1. ГОСТ ISO 13485-2017. Медицинские изделия. Системы менеджмента качества. Требования для целей регулирования. – М.: Стандартинформ, 2018.
2. ГОСТ ISO 14971-2021. Изделия медицинские. Применение менеджмента риска к медицинским изделиям. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.
3. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 10,11.2017 № 106 «О Требованиях к внедрению, поддержанию и оценке системы менеджмента качества медицинских изделий в зависимости от потенциального риска их применения».
4. Постановление Правительства РФ от 27.12.2012 № 1416 «Об утверждении Правил государственной регистрации медицинских изделий».
5. ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.
6. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. 3D-печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.
7. Карлов А.В., Шахов В.П. Системы внешней фиксации и регуляторные механизмы оптимальной биомеханики. – Томск: STT, 2001.
8. Репин В.В., Елиферов В.Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013.

Вертинская Н.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
natalivertinsckaya@yandex.ru
Парфеньева И.Е.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»,
Московский политехнический университет,
Россия, Москва
iparfeneva@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ В НАУКОЕМКИХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

Аннотация. В статье исследуются организационно-управленческие механизмы повышения эффективности системы контроля качества продукции в наукоемких организациях, функционирующих в условиях высокой технологической сложности, неопределенности и проектного характера деятельности. Обосновывается необходимость перехода от преимущественно инспекционного контроля к системному управлению качеством на всех стадиях жизненного цикла изделия. Раскрываются роль процессного подхода, рискориентированного мышления, интеграции контроля качества с управлением проектами, применения превентивных методов анализа отказов и статистического управления процессами. Предлагается комплекс управленческих решений, направленных на снижение затрат на несоответствия, повышение воспроизводимости характеристик продукции и устойчивости производственных процессов.

Ключевые слова: система контроля качества, наукоемкая организация, процессный подход, рискориентированное мышление, цифровая трансформация, статистическое управление процессами, аудит качества.

Vertinskaya N.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
natalivertinsckaya@yandex.ru
Parfenieva I.E.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
iparfeneva@mail.ru

ORGANIZATIONAL AND MANAGERIAL MECHANISMS FOR IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF PRODUCT QUALITY CONTROL SYSTEMS IN HIGH-TECH ORGANIZATIONS

Abstract. The paper examines organizational and managerial mechanisms aimed at improving the effectiveness of product quality control systems in knowledge-intensive organizations operating under conditions of high technological complexity and project-based activities. The necessity of shifting from inspection-oriented control to life-cycle quality management is

substantiated. The role of the process approach, risk-based thinking, integration of quality control with project management, preventive failure analysis methods, and statistical process control is analyzed. A set of managerial solutions focused on reducing nonconformance costs, enhancing product reproducibility, and ensuring process stability is proposed.

Keywords: quality control system, science-intensive organization, process approach, risk-oriented thinking, digital transformation, statistical process control, and quality audit.

Система контроля качества продукции в наукоемких организациях представляет собой не изолированный набор проверочных операций, а встроенный элемент производственного цикла, обеспечивающий достижение требуемых характеристик изделия на всех стадиях его жизненного цикла. В отношении высокотехнологичной продукции контроль качества выступает инструментом предупреждения производственных отклонений, подтверждения соответствия установленным требованиям и обеспечения надежности конечного изделия. Такая постановка вопроса соответствует современному пониманию стандартизации и промышленной политики, в рамках которых обеспечение качества, технологической устойчивости и безопасности продукции рассматривается как часть государственной и производственной стратегии.

Развитие наукоемких отраслей промышленности сопровождается усложнением производственных систем, увеличением доли интеллектуального труда и ростом требований к надежности и воспроизводимости характеристик продукции. В этих условиях система контроля качества приобретает стратегическое значение, поскольку от ее результативности зависит не только соответствие продукции установленным требованиям, но и устойчивость функционирования организации в целом. При этом современные исследования Е. С. Балашовой, Е. А. Малышевой и С. А. Васильевой показывают, что эффективность контроля качества определяется прежде всего организационно-управленческими факторами, а не исключительно техническими средствами измерения и проверки [1].

Как отмечают Н. П. Асташева, Е. А. Жидкова и Л. П. Шумская, наукоемкие организации характеризуются высокой степенью технологической неопределенности, длительным жизненным циклом продукции, сложными кооперационными связями и необходимостью соблюдения жестких нормативных требований. В подобных условиях контроль качества не может ограничиваться функцией выявления дефектов на завершающей стадии производства. Он должен быть интегрирован в систему управления организацией и охватывать все этапы жизненного цикла изделия – от формирования требований и проектирования до испытаний, серийного выпуска и сопровождения [2]. Следовательно, речь идет о формировании сквозного управленческого контура качества, в котором контроль выступает элементом более широкой системы менеджмента.

Одним из ключевых организационных механизмов повышения эффективности системы контроля качества является четкое распределение ответственности и полномочий в области качества. Отсутствие ясной ролевой структуры приводит к фрагментации функций и возникновению «зон неопределенности», в которых причины несоответствий остаются без должного анализа. В современных условиях, как отмечает Н. В. Миронова, особое значение приобретает закрепление владельцев процессов качества, формирование межфункциональных комиссий по управлению изменениями и установление прозрачной системы отчетности по показателям качества [3]. Такой подход обеспечивает системность управленческих решений и способствует снижению повторяемости дефектов.

Вторым значимым механизмом, по мнению В. А. Васильева, выступает процессная регламентация контроля качества. Эффективность контроля возрастает при его интеграции в технологический процесс на основе заранее определенных критериев приемки, контрольных точек и алгоритмов реагирования на отклонения. Исследования в области управления качеством подчеркивают, что формализация процедур контроля и их связь с технической документацией позволяют обеспечить стабильность производственных процессов и повысить предсказуемость результатов [8]. Процессный подход предполагает проектирование контроля как части технологической системы, что минимизирует вероятность случайных и субъективных решений.

В условиях цифровой трансформации промышленности особое значение приобретает цифровизация процессов контроля качества. Развитие концепции Индустрии 4.0 связано с внедрением киберфизических систем, автоматизированного сбора данных и аналитических инструментов, что открывает новые возможности для управления качеством [6].

Однако цифровизация сама по себе не гарантирует повышения эффективности контроля. Необходимым условием является предварительная стандартизация данных, унификация классификаторов дефектов и регламентация электронного документооборота. В исследованиях, посвященных цифровизации систем менеджмента качества, подчеркивается, что внедрение цифровых инструментов требует пересмотра организационных процедур и усиления управленческого контроля за достоверностью данных [4].

Особое место в системе современных технологий контроля качества наукоемкой продукции занимают цифровые двойники и виртуальные испытания. Данные технологии позволяют формировать цифровую модель изделия, способную воспроизводить его поведение в различных условиях функционирования и внешнего воздействия. Применение цифровых двойников в системе качества принципиально меняет саму логику контроля. Если традиционный подход ориентирован главным образом на проверку уже изготовленного изделия, то цифровой двойник дает возможность выявлять потенциальные проблемные зоны еще на стадиях проектирования и подготовки производства. Это особенно важно для сложных изделий, в которых дефект

может возникать вследствие не только производственного нарушения, но и недостаточно оптимального конструкторского решения.

В результате цифровые двойники позволяют заранее оценивать влияние отдельных отклонений на надежность и долговечность изделия, оптимизировать программу натурных испытаний и снижать затраты на доработку готовых образцов.

Существенным элементом цифрового контура качества является обеспечение прослеживаемости продукции и производственных операций. Интеграция данных проектирования, технологической подготовки и контроля позволяет формировать единый информационный след изделия, что существенно облегчает анализ причин несоответствий и повышает доказательность качества [10]. В высокотехнологичной промышленности широкое распространение получает использование цифровых двойников, которые позволяют моделировать поведение изделия и процессов, выявлять потенциальные риски и оптимизировать контрольные мероприятия [11]. Таким образом, цифровые технологии становятся инструментом превентивного управления качеством.

Не менее перспективным направлением является внедрение интеллектуальных методов обработки данных контроля. Современные системы качества все чаще ориентируются не только на фиксацию факта несоответствия, но и на выявление закономерностей в накопленных массивах контрольной информации.

Для наукоемкого предприятия это означает возможность использования алгоритмов интеллектуального анализа данных для распознавания типовых дефектов, группировки несоответствий по вероятным причинам, прогнозирования участков производственного цикла с повышенным риском брака и поддержки принятия решений в сфере качества. Практически это может выражаться в автоматизированной аналитике повторяющихся отклонений, формировании рейтинга наиболее проблемных операций, прогнозе вероятности отказов по данным испытаний и генерации рекомендаций по корректировке технологических режимов. Применение таких технологий не исключает профессионального участия специалистов, но существенно усиливает аналитический потенциал службы качества.

Третьим ключевым механизмом повышения эффективности контроля качества является рискориентированный подход. В наукоемких организациях значительная часть дефектов обусловлена вариабельностью процессов и сочетанием нескольких факторов. Поэтому планирование контроля должно основываться на анализе критических характеристик продукции и технологических операций. Применение методов оценки рисков позволяет сосредоточить контрольные ресурсы на наиболее значимых зонах и снизить вероятность критических несоответствий [9]. Рискориентированное управление предполагает классификацию дефектов по степени их влияния на безопасность и функциональность изделия, а также установление дифференцированных мер реагирования.

Особое значение в рамках рискориентированного подхода имеет управление изменениями. Любые изменения в конструкции, технологии, составе материалов или программном обеспечении способны повлиять на параметры качества. В этой связи необходима формализация процедуры контроль изменений (change-control), предусматривающей анализ потенциального влияния изменений, пересмотр контрольных планов и проведение дополнительных испытаний при необходимости [5].

Организационная дисциплина управления изменениями позволяет предотвратить рост дефектности в период внедрения нововведений и обеспечить стабильность процессов.

Важным направлением повышения эффективности контроля качества является управление качеством поставщиков. Наукоемкие изделия включают большое количество покупных компонентов, и несоответствия на входе могут существенно повлиять на конечный результат. Формирование системы оценки поставщиков, проведение аудитов, анализ статистики дефектов и совместная реализация корректирующих мероприятий способствуют снижению рисков и повышению устойчивости производственной цепочки [12].

Эффективное управление кооперацией позволяет сократить объем входного контроля и снизить суммарные издержки качества.

Как отмечает А. П. Агарков, наряду с организационными и цифровыми механизмами важнейшую роль играет развитие культуры качества. Формирование у сотрудников понимания значимости качества, развитие компетенций в области анализа причин несоответствий и статистических методов управления процессами создают основу для устойчивых улучшений [13]. Культура качества предполагает отказ от практики поиска виновных и переход к системному анализу причин дефектов, что способствует повышению открытости и вовлеченности персонала.

Систематизация рассмотренных организационно-управленческих механизмов позволяет представить их в структурированном виде, отражающем взаимосвязь направлений управленческого воздействия, инструментов реализации и ожидаемых эффектов для системы контроля качества (таблица).

Таблица

Организационно-управленческие механизмы повышения эффективности системы контроля качества в наукоемких организациях

Контур	Содержание управленческого механизма	Инструменты/практики реализации	Ожидаемый эффект для контроля качества
Структурно-ролевой	Закрепление ответственности за качество по сквозным процессам и критическим характеристикам	Владельцы процессов, RACI-матрица, межфункциональные комиссии по качеству и изменениям	Снижение «разрывов» ответственности, ускорение управленческих решений
Процессно-регламентный	Встраивание контроля в технологические процессы и нормативное закрепление критериев приемки	Контрольные планы, карты контроля, регламенты операционного контроля, стандартизация операций	Повышение воспроизводимости, снижение субъективности контроля
Риск-аналитический	Приоритизация контроля по критичности и вероятности несоответствий	Анализ рисков, классификация CTQ, усиление контроля при изменениях, анализ причин (5 Why и др.)	Снижение критических несоответствий, раннее выявление дрейфа процесса
Цифровой	Формирование единого информационного следа качества по жизненному циклу	Электронная регистрация результатов, единые классификаторы дефектов, интеграция с ERP/MES/QMS	Рост доказательности качества, ускорение анализа причин, снижение потерь информации
Управление изменениями	Регламентированная оценка влияния изменений на качество и актуализация контроля	Процедуры контроля изменений (change-control), версионность конструкторской/ технологической документации, дополнительные испытания и контроль при изменениях	Предотвращение «всплесков дефектов» при модернизации и обновлениях
Управление качеством поставщиков	Снижение рисков входных несоответствий и потерь в кооперации	Квалификация поставщиков, аудиты, мониторинг качества поставок, корректирующие действия	Уменьшение дефектов на входе, сокращение затрат на входной контроль
Кадрово-культурный	Развитие компетенций и культуры качества, поддерживающей выявление проблем	Обучение, разборы несоответствий, стандартизация знаний, вовлечение персонала	Устойчивость улучшений, снижение скрытых дефектов, рост дисциплины данных

Комплексная реализация рассмотренных механизмов позволяет сформировать интегрированную модель повышения эффективности системы контроля качества в наукоемких организациях. Такая модель основывается на принципах процессного управления, цифровой прослеживаемости, рискориентированного планирования и непрерывного совершенствования. Ее внедрение обеспечивает сокращение уровня дефектности, снижение затрат на переделки и рекламации, повышение доверия со стороны заказчиков и регуляторов.

Таким образом, эффективность системы контроля качества в наукоемких организациях является результатом системной организационно-управленческой работы. Современные условия цифровой трансформации и усложнения продукции требуют перехода от локального усиления контрольных процедур к формированию комплексной архитектуры качества,

интегрированной в стратегию развития предприятия. Реализация данного подхода создает предпосылки для устойчивого повышения конкурентоспособности и технологической надежности продукции.

Список литературы

1. Балашова, Е. С. Применение системы менеджмента качества в разрезе эффективной деятельности сложных промышленных систем / Е. С. Балашова, Е. А. Малышев, С. А. Васильева // π-Economy. – 2022. – Т. 15, № 6. – С. 100–112.
2. Асташева, Н. П. Управление качеством технологических процессов: монография / Н. П. Асташева, Е. А. Жидкова, Л. П. Шумская [и др.]. – 2-е изд. – Москва: Научный консультант, 2024. – 189 с.
3. Миронова, Н. В. Проблемы функционирования системы управления качеством организации и пути ее совершенствования на основе цифровизации процессов СМК / Н. В. Миронова // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 5 (86). – С. 58–62.
4. Кузьмина, С. Н. Цифровизация качества: вызовы и возможности / С. Н. Кузьмина, В. С. Голубев, П. В. Марченко, Т. Р. Мухтаров, П. В. Голубенко // Современное образование и общество. – 2025. – Т. 2, № 1. – С. 28–37.
5. Клочков, Ю. П. Механизмы управления качеством на основе цифровых технологий / Ю. П. Клочков // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – № 11. – С. 12–17.
6. Балашов, В. А. Индустрия 4.0 в России: сущность и перспективы / В. А. Балашов // Теоретическая экономика. – 2025. – № 10, – С. 46–59.
7. Фонтана, А. Р. Смарт-фабрика – новая организация производства / А. Р. Фонтана, Б. А. Ерзнкян // Друкеровский вестник. – 2022. – № 4. – С. 53–67.
8. Васильев, В. А. Управление качеством: монография / В. А. Васильев. – Москва: МАИ, 2022. – 158 с.
9. Извеков, А. А. Пути совершенствования качества наукоемких изделий комбинированными методами / А. А. Извеков, В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 9. – С. 14–24.
10. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях инновационной экономики: коллективная монография / под науч. ред. М. Я. Веселовского, Н. С. Хорошавиной. – Москва, 2021. – 296 с.
11. Боровков, А. И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / А. И. Боровков, С. В. Блинников, А. А. Греков [и др.]. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2022. – 481 с.
12. Деева, В. А. Управление качеством: учебное пособие / В. А. Деева, Н. А. Кобиашвили, Б. А. Кобулов. – 2-е изд. – Москва: Юриспруденция, 2024. – 102 с.
13. Агарков, А. П. Управление качеством: учебник / А. П. Агарков. – 3-е изд., стер. – Москва: Дашков и К, 2022. – 208 с.

Акулов Н.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
nik.akulov07@mail.ru
Нарышкин Р.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
naryshkin04@bk.ru
Жебоноева К.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
xeboor@gmail.com
Аллагулова В.О.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
veronikaallagulova06@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ

Аннотация. Данная статья посвящена анализу использования больших данных (Big Data) в управлении качеством (Data-Driven Quality Management). Рассматриваются ключевые аспекты сбора, обработки и анализа данных для повышения эффективности производственных процессов, прогнозирования возможных проблем и улучшения качества продукции и услуг. Особое внимание уделено практическим примерам применения Big Data в различных отраслях, таких как производство, логистика и сервисная деятельность. Подчеркивается важность внедрения Data-Driven подходов для обеспечения конкурентоспособности компаний в условиях динамично изменяющегося рынка.

Ключевые слова: Data-Driven, в менеджменте, дизайне, маркетинге, принципы и преимущества Data-Driven Quality Management.

Akulov N.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
nik.akulov07@mail.ru
Naryshkin R.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
naryshkin04@bk.ru
Zhebonoeva K.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
xeboor@gmail.com
Allagulova V.O.
Student

Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
veronikaallagulova06@mail.ru

DATA-DRIVEN QUALITY MANAGEMENT

Abstact. This article is devoted to the analysis of the use of big data in quality management (Data-Driven Quality Management). The key aspects of data collection, processing and analysis are considered to improve the efficiency of production processes, predict possible problems and improve the quality of products and services. Special attention is paid to practical examples of the use of Big Data in various industries such as manufacturing, logistics and service activities. The importance of implementing Data-Driven approaches to ensure the competitiveness of companies in a dynamically changing market is emphasized.

Keywords: Data-Driven, in management, design, marketing, principles and advantages of Data-Driven Quality Management.

Актуальность темы связана с тем, что современные организации сталкиваются с необходимостью постоянного совершенствования своих продуктов и услуг для поддержания конкурентоспособности на рынке. В условиях быстро меняющейся внешней среды традиционные методы управления качеством часто оказываются недостаточными. Использование данных и их всесторонний анализ позволяют компаниям принимать более обоснованные решения, минимизировать риски и повысить эффективность производственных процессов. Управление качеством на основе данных становится ключевым элементом стратегического развития компаний, стремящихся к лидерству в своей отрасли. Это направление активно развивается благодаря широкому внедрению цифровых технологий, автоматизации и аналитических инструментов. Данные становятся не просто информацией о прошлом, но мощным ресурсом для прогнозирования будущих тенденций и оптимизации текущих операций.

Что такое Data Driven:

Data Driven (дословно – «управляемый данными») – это подход к управлению, основанный на данных. Его главный постулат: решения нужно принимать, опираясь на анализ цифр, а не интуицию и личный опыт.

Data Driven применяют в разных областях бизнеса и науки. Мы рассмотрим, как подход используется в digital: маркетинге, дизайне и менеджменте.

Принципы подхода:

1. Готовность к инвестициям: необходимо извлекать, хранить, анализировать и визуализировать данные, что требует времени и денег.

2. Умение анализировать и интерпретировать: для анализа и построения гипотез нужны специальные знания и опыт.

3. Принятие решений на основе данных: важно собирать и анализировать цифры перед принятием значимых решений.

4. Доверие данным: данные должны быть точными и чистыми для правильной интерпретации.

Принятие решений на основе данных, или Data Driven Decision, стало популярным в бизнесе с 90-х годов. Этот подход предполагает понимание данных и умение строить прогнозы на их основе, чтобы осознать последствия решений, необходимые изменения и ожидаемые результаты. Использование фактических данных становится ключевым в управленческих решениях.

В первую очередь нужно определить бизнес-цель на текущем этапе, например, это может быть рост прибыли или доли на рынке. Второй шаг – обозначить стадии и промежуточные цели, достижение которых определяется метриками. Достижение метрики говорит о том, что компания движется в правильном направлении.

К примеру, рост прибыли можно оценить по количеству новых клиентов, среднему показателю оттока клиентов, размеру среднего чека, количеству повторных продаж, проценту конверсии и показателю маржинальности.

Важно, чтобы цели были достижимы, а метрики грамотно подобраны:

- Метрика должна выражаться в относительных показателях. Например, измерять скорость удобнее всего в километрах в час, то есть скорость – это пройденное расстояние относительно времени.
- Метрика должна быть сравнительной – это значит, что вы должны иметь возможность сравнить показатели с предыдущим периодом.
- Их не должно быть много: по 3−5 на этап.

Популярные метрики для оценки бизнеса: уровень удовлетворенности клиента, вовлеченности сотрудников, объем прибыли до вычета расходов и т.д.

Еще один важный момент, который необходимо учитывать, – поведенческая психология руководителей, те моменты, когда интерпретация данных подстраивается под личные приоритеты менеджера.

Data Driven в менеджменте:

Data Driven Management – управление бизнесом на основе объективных, фактических данных.

Подход открывает перед управленцами широкие возможности:

- Сокращение маркетинговых издержек. Анализ рекламных кампаний направлен на то, чтобы они были эффективнее: тратить по минимуму, чтобы зарабатывать по максимуму.
- Повышение эффективности инвестиций. Данные могут рассказать, как привлечь новую аудиторию, повысить качество пользовательского опыта и пр.
- Рост клиентоориентированности. Детальный анализ данных помогает понять предпочтения целевой аудитории, выстроить персональные коммуникации с клиентом, отслеживать отзывы.
- Оперативное реагирование на изменения рынка. Отслеживание данных в реальном времени позволяет принимать решения практически молниеносно.

Data Driven используют крупнейшие компании мира: Intel, Google, Chevron. В России, например, «Сбербанк». В банке с каждым годом растет

количество решений, принятых на основе анализа данных. В качестве ключевого подхода к моделированию «Сбербанк» использует CRISP – Cross Industries Standard Process по Data Mining – межотраслевой стандарт извлечения данных.

Data Driven в дизайне:

Data Driven Design – проектирование продуктов на основе данных, полученных с помощью тестов, исследований, проверки гипотез. Раньше предполагалось, что дизайнер принимает решения на основе собственного вкуса и опыта, однако сейчас этого недостаточно. Работа в digital оценивается по KPI (Key Performance Indicators) и, чтобы их достичь, необходимо уметь прогнозировать, а значит анализировать.

Преимущества подхода:

- Для дизайнера. Меньше необоснованных правок и споров, исключается элемент вкусовщины.
- Для заказчика. Нет действий, сделанных наугад, все решения обоснованы.

При таком подходе подрядчик и заказчик концентрируют свои усилия, чтобы сделать сервис удобным пользователям, а не удовлетворять чьи-либо амбиции.

Новый уровень требований привел к тому, что профессия дизайнера распалась на несколько самостоятельных единиц – теперь над проектами работают целые дизайн-команды: UI-дизайнер, UX-проектировщик, дизайнер анимации, аналитики и арт-директор. Также подключаются специалисты по Big Data (data scientist).

Data Driven Design – это постоянные циклы улучшений, но здесь есть риск погрязнуть в данных и уделить излишнее внимание мелочам. Такое явление получило название датацентризм.

Например, в 2009 году из-за подобного подхода из Google уволился ведущий дизайнер.

Дуглас Боумен бывший креативный директор Twitter, был ведущим дизайнером в Google:

“Да, это правда, что команда в Google не могла выбрать между двумя вариантами синего, поэтому они тестируют 41 оттенок, чтобы увидеть, какой из них лучше работает. Недавно у меня была дискуссия о том, должна ли граница быть шириной 3, 4 или 5 пикселей, и меня попросили доказать свою правоту. Я не могу действовать в такой обстановке. Я уже устал обсуждать такие незначительные дизайнерские решения. В этом мире есть более захватывающие проблемы дизайна, которые требуют решения.»

Data Driven в маркетинге:

Новая концепция Data-driven маркетинга опирается на старую поговорку: «Невозможно управлять тем, что нельзя измерить». В Data driven бизнесе измерить можно и нужно все. В первую очередь это касается маркетинговой аналитики: релевантная информация о клиентах необходима для выстраивания персонализированных и действенных таргет-кампаний.

Еще в 2013 году 74% онлайн-потребителей заявляли, что разочаровываются в сайтах, на которых появляется контент, не соответствующий их интересам. 50% посетителей сайта просто покинут платформу, увидев такой контент. Чтобы оставаться конкурентоспособными при таких условиях рынка, предприятиям необходимо сосредоточиться на анализе и применении данных в своих маркетинговых кампаниях.

Data Driven маркетинг позволяет персонализировать взаимодействие с клиентом, что необходимо в условиях постоянно растущей конкуренции. Сегодня персонализированный маркетинг выходит далеко за рамки именных приветствий по электронной почте. Он определяет, что, как и когда видит клиент онлайн. Все всплывающие окна, акции и реклама появляются перед глазами пользователя в наиболее удачный для компании момент.

Такие целевые сообщения достигают бóльших результатов, чем общие рассылки, а сегментация рекламных кампаний позволяет получить более высокий ROI. Например, если магазин продает и мужскую, и женскую одежду, ему понадобятся как минимум два набора маркетинговых рассылок. Такая же ситуация с разными точками дистрибьюции − маркетинговая тактика для московской аудитории должна отличаться от кампаний, ориентированных на казанских покупателей. На основе данных и создается оптимальная рабочая схема, удобная для управления и масштабирования.

Успех Data Driven маркетинга зависит от точности данных о клиентах. Даже самые простые алгоритмы сбора информации бесполезны, если, если она не будет правильно отражать интересы клиентов и целевой рынок. Следует обращаться к существующей клиентской базе, чтобы сформировать представление о целевой аудитории.

Маркетинг на основе данных − это итеративный процесс, который постоянно развивается и расширяется. В грамотно выстроенном маркетинге процесс анализа и интерпретации данных ведется постоянно. Нельзя оперировать данными пятилетней давности для работы с современной аудиторией сайта. Поэтому важным фактором успеха является управление данными. Оно помогает выстроить процесс регулярного анализа данных о клиентах, оценивать новые возможности маркетинга, а также экономить время и ресурсы команды (рис.).

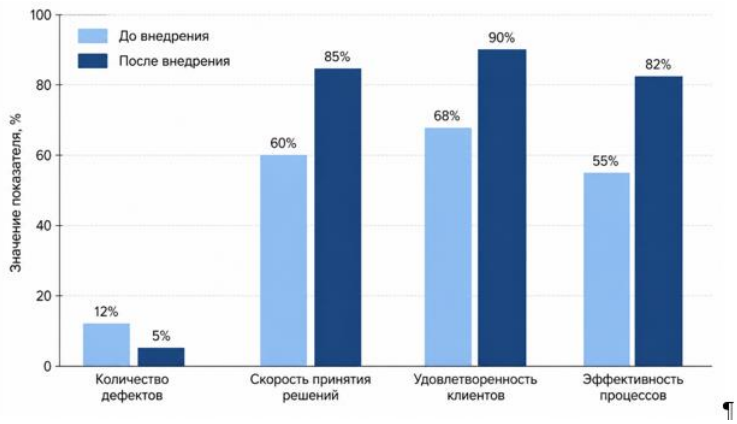


Рис. Влияние Data-Driven подхода на показатели организации

Какие данные собирают:

- Об обслуживании клиентов
- Об удовлетворенности пользователей
- О поведении пользователей на сайте или приложении

Цели:

- Увеличение эффективности.
- Привлечение новых и удержание постоянных клиентов.
- Персонализированный подход к коммуникациям с пользователями.
- Понимание потребностей пользователей с помощью анализа данных.
- Повышение клиентоориентированности.

Data Driven Marketing позволяет:

- Прогнозировать поведение пользователей на основе паттернов.
- Таргетировать предложения, сообщения и контент.
- Определить целевую аудиторию рекламной кампании.
- Повысить эффективность рекламных кампаний.
- Увеличить пожизненную ценность клиента (LTV) за счет повышения количества повторных продаж.
- Оперативно реагировать на изменения рынка.

Метрики:

Чтобы не распыляться, важно отслеживать только самое важное. Метрики для электронной коммерции:

- Conversion Rate – показатель конверсии, процент пользователей, которые совершили конверсионное действие, например оставили заявки или купили. Позволяет прогнозировать прибыль.
- Cost Per Action – цена за клик, стоимость, которую вы платите за привлечение одного пользователя. Позволяет оценить целесообразность вложений и возврат инвестиций из рекламного канала.
- Shopping Cart Abandonment – «брошенные корзины», количество пользователей, которые бросили оформление заказа на определенном этапе. Позволяет найти узкие места в воронке продаж [1].

Принципы Data-Driven Quality Management:

1. Систематический сбор данных: Организации должны выстраивать систему сбора данных из различных источников, включая производственные процессы, отзывы клиентов и инспекционные отчёты.
2. Анализ данных: Использование аналитических инструментов и методов, таких как машинное обучение и статистический анализ, для выявления закономерностей и аномалий в данных.
3. Принятие решений на основе данных: Руководители должны опираться на результаты анализа, а не на интуитивные предположения, что позволяет минимизировать ошибки и повысить обоснованность принимаемых решений.

4. Непрерывное улучшение: DDQM схож с философией непрерывного улучшения, где организация нацелена на постоянное совершенствование своих процессов на основе аналитики.

Преимущества Data-Driven Quality Management:

1. Улучшение качества продуктов и услуг: На основе данных легче выявлять проблемные области и принимать меры для их устранения.
2. Снижение затрат: Путём оптимизации процессов и исключения неэффективных практик можно сократить издержки, связанные с производственными ошибками и возвратами.
3. Повышение удовлетворённости клиентов: Использование отзывов и предпочтений клиентов позволяет создавать более качественные и востребованные продукты.
4. Лучшее управление рисками: Анализ данных помогает заранее выявлять потенциальные проблемы и минимизировать риски, связанные с качеством.

Таблица

Основные преимущества внедрения Data-Driven Quality Management

Направление применения	Используемые данные	Результат внедрения
Производство	Данные о дефектах, показателях оборудования, производственных отклонениях	Снижение количества брака и повышение стабильности процессов
Менеджмент	Финансовые показатели, KPI, аналитические отчёты	Повышение обоснованности управленческих решений
Маркетинг	Данные о клиентах, конверсии, рекламных кампаниях	Повышение эффективности продвижения и персонализации
Сервис	Отзывы клиентов, обращения, уровень удовлетворенности	Улучшение качества обслуживания и повышение лояльности
Разработка продуктов	Анализ потребностей рынка и поведения пользователей	Создание более востребованных продуктов и услуг
Логистика	Данные о поставках, маршрутах и сроках доставки	Оптимизация затрат и ускорение поставок

Таким образом, управление качеством на основе данных становится неотъемлемой частью стратегий многих организаций. DDQM позволяет не только повышать качество продукции и услуг, но и снижать затраты, повышать удовлетворённость клиентов и улучшать конкурентоспособность. Внедрение данной методологии требует инвестиций в технологии и обучение, однако её преимущества делают эти вложения оправданными.

Список литературы

1. Деминг Э. Выход из кризиса: новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг. – Москва : Альпина Паблишер, 2022. – 417 с. – ISBN 978-5-9614-6854-8.
2. Гаврилов Л. П. Информационные технологии в управлении : учебное пособие для вузов / Л. П. Гаврилов. – Москва : Юрайт, 2023. – 271 с. – ISBN 978-5-534-12352-4.
3. ISO 9001:2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2021. – 32 с.
4. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент / Ф. Котлер, К. Келлер. – 15-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2023. – 848 с. – ISBN 978-5-4461-0422-2.
5. Окрепилов В. В. Управление качеством : учебник / В. В. Окрепилов. – Москва : Экономика, 2021. – 639 с. – ISBN 978-5-282-03472-1.
6. Data-Driven: что это такое и как применять подход в бизнесе [Электронный ресурс] // Uplab. – URL: **Uplab** (дата обращения: 14.05.2026).
7. Data-Driven Quality Management [Электронный ресурс] // ComplianceQuest. – URL: **ComplianceQuest** (дата обращения: 14.05.2026).
8. What is Data-Driven Quality Control? [Электронный ресурс] // Exor. – URL: **Exor** (дата обращения: 14.05.2026).
9. Data-driven подход: как принимать решения на основе данных [Электронный ресурс] // Хабр. – URL: **Хабр** (дата обращения: 14.05.2026).
10. Управление качеством данных: что это такое и зачем нужно [Электронный ресурс] // Astera. – URL: **Astera** (дата обращения: 14.05.2026).

Суслов М.В.
к.т.н., заведующий кафедрой «Полиграфические системы»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
m.v.suslov@mospolytech.ru
Кадочникова А.Н.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
a.cadochnickova@yandex.ru

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В работе проведён сравнительный анализ двух методов аддитивного производства – FDM и LCD – на примере детали «Каркас». Актуальность исследования обусловлена активным внедрением аддитивных технологий в промышленность и потребностью в обосновании выбора метода послойного синтеза. Для проведения эксперимента построена 3D-модель детали, выполнено изменение геометрии под ограничения рабочей камеры LCD-принтера без изменения контрольных размеров, что позволило сохранить чистоту сравнительного анализа. Изготовлены тестовые образцы, проведены измерения 11 контрольных размеров, включая диаметры сквозных отверстий, толщину стенок и линейные габариты. Установлено, что метод LCD обеспечивает более высокую точность и качество поверхности по сравнению с FDM. Большинство размеров LCD-образца попа-

дает в поле допуска согласно требованиям ЕСКД, тогда как образец FDM продемонстрировал заметные отклонения. Качество поверхности FDM-образца характеризуется выраженной шероховатостью и требует дополнительной постобработки. Результаты могут быть использованы при обосновании выбора технологии аддитивного производства для изготовления деталей с заданными допусками. Технология LCD рекомендована для ответственных деталей с повышенными требованиями к точности и качеству поверхности, технология FDM целесообразна при изготовлении крупногабаритных деталей, не требующих высокой точности, или на начальных этапах прототипирования.

Ключевые слова: Аддитивные технологии; послойный синтез; точность изготовления; сравнительный анализ; FDM; LCD.

Suslov M.V.
Candidate of Technical Sciences, Head of the Printing Systems Department
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
m.v.suslov@mospolytech.ru
Kadochnikova A.N.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
a.cadochnickova@yandex.ru

ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF PRODUCTS MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS

Abstact. The paper presents a comparative analysis of two additive manufacturing methods, FDM and LCD, using the «Frame» part as an example. The relevance of the study is due to the active implementation of additive technologies in industry and the need to justify the choice of the layer-by-layer synthesis method. To conduct the experiment, a 3D model of the part was created, and the geometry was modified to fit the limitations of the LCD printer's working chamber without changing the control dimensions, which ensured a fair comparison. Test samples were produced, and 11 control dimensions were measured, including the diameters of through holes, wall thicknesses, and linear dimensions. It was found that the LCD method provides higher accuracy and surface quality compared to FDM. Most of the dimensions of the LCD sample fall within the tolerance range according to the requirements of the Unified System of Design Documentation, while the FDM sample showed noticeable deviations. The surface quality of the FDM sample is characterized by pronounced roughness and requires additional post-processing. The results can be used to justify the choice of additive manufacturing technology for producing parts with specified tolerances. LCD technology is recommended for critical parts with high requirements for accuracy and surface quality, while FDM technology is suitable for producing large-scale parts that do not require high accuracy or for initial prototyping stages.

Keywords: Additive technologies; layer-by-layer synthesis; manufacturing accuracy; comparative analysis; FDM; LCD.

С давних времен производство и машиностроение занимают важную часть в экономике и развитии страны. Традиционные способы изготовления

деталей имеют как преимущества, так и недостатки. Их применение позволяет получить прочные, точные и износостойкие детали, но такие способы могут быть времязатратными или дорогостоящими.

С каждым днем происходит усовершенствование цифровых технологий, а инновации становятся доступными для использования в различных сферах жизни человека. Аддитивные технологии пользуются все большим спросом при изготовлении деталей любой сложности во всем мире.

Современное развитие промышленности характеризуется активным внедрением аддитивных технологий, позволяющих изготавливать детали сложной геометрической формы. Однако, несмотря на широкое разнообразие методов послойного синтеза, остается проблема обеспечения геометрической точности важных конструкторских размеров и всей детали в целом. Детали, изготовленные на разном оборудовании или разными методами послойного синтеза, на практике часто демонстрируют неточность размеров.

В условиях активного внедрения цифровых и инновационных технологий возникает потребность в сравнении и обосновании выбора метода послойного синтеза (аддитивных технологий), который будет соответствовать требованиям Единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

Цель данной работы заключается в проведении сравнительного анализа геометрических параметров деталей, изготовленных разными методами послойного синтеза, на соответствие требованиям технической документации.

Описание конструкции детали

В данной работе рассмотрена деталь «Каркас», состоящая из основных геометрических элементов, необходимых для проведения сравнительного анализа.

Каркас представляет собой несущую конструкцию и призван выдерживать нагрузки, обеспечивать надежность и устойчивость объекта. Деталь «Каркас» – самая жесткая часть фюзеляжа летательного аппарата. На нее крепятся все крышки, исполнительные механизмы и датчики. Изделие «Каркас» имеет габаритные размеры 162 мм*100 мм*100 мм.

Для выбранной и проанализированной детали была построена 3D-модель в программе КОМПАС-3D (рис. 1), а также выполнен чертеж.



Рис. 1. Модель детали «Каркас»

Данное изделие содержит ключевые конструкторские элементы, необходимые для оценки точности аддитивных технологий и проведения сравнительного анализа. Сквозные отверстия, плоские поверхности и толщина стенок помогут оценить точность изготовления детали методом послойного синтеза.

Описание технологий

В данной работе для достижения результатов деталь создавалась с помощью двух методов послойного синтеза: Fused Deposition Modeling (FDM) и LCD (Liquid Crystal Display). Данные технологии являются одними из самых распространенных и востребованных способов аддитивного производства.

Fused Deposition Modeling – метод послойного синтеза пластиковой нити. Он является одним из самых популярных, дешевых и простых способов. Данная технология использует материалы в виде нити или прутка разных диаметров. FDM технология 3D печати зарекомендовала себя как самый доступный и популярный способ послойного синтеза. Данный вид печати позволяет получить детали сложной конфигурации за счет быстрого и легкого процесса изготовления и постобработки.

LCD (Liquid Crystal Display) – метод послойного синтеза, основанный на послойном отверждении фотополимерных смол, чувствительных к свету, с использованием ультрафиолетового излучения. Преимуществами данной технологии, прежде всего, являются высокая скорость печати и отличная детализация (независимо от сложности геометрии).

Использование технологии FDM позволит оценить погрешность, вызванную усадкой. Метод LCD является одной из самых точных и доступных технологий. Каждая из технологий вносит уникальные искажения в геометрию детали, что позволяет комплексно оценить влияние способа печати на точность измерений.

Изменение геометрии

Первоначально разработанная трехмерная модель детали имела габаритные размеры, которые соответствуют ее функциональному назначению согласно требованиям конструкторской документации. Однако в процессе подготовки было выявлено, что полномасштабное изготовление данной детали невозможно ввиду ограничений оборудования: максимальные размеры исходной модели превышали допустимые размеры рабочей камеры. В связи с этим печать объекта оказалась технически нереализуема без применения дорогостоящего оборудования, что не входит в рамки данной работы.

Было принято решение об изменении геометрии детали, что обеспечило возможность проведения сравнительного анализа. Преобразование заключалось в сокращении высоты детали. Диаметры отверстий и толщина стенок при этом остались неизменными. Это позволило сохранить возможность измерения и сравнения параметров ключевых элементов и поместить деталь в рабочую область построения фотополимерного принтера (рис. 2).

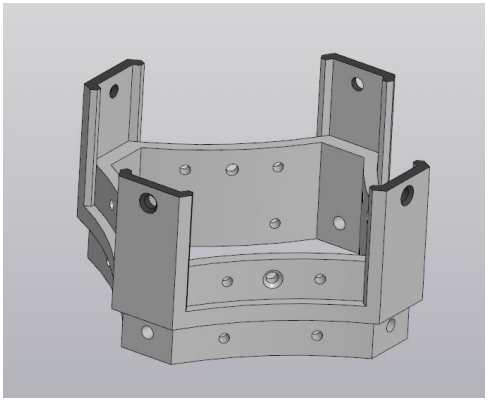


Рис. 2. Упрощенная модель детали «Каркас»

Важно учесть, что изменение геометрии детали не подразумевает полную модификацию, а необходимо лишь для печати на фотополимерном принтере. В условиях изготовления на промышленных установках изменение геометрии не требуется.

Таким образом, упрощение геометрии не привело к утрате значимых геометрических параметров, влияющих на точность измерения и последующий сравнительный анализ.

Сравнительный анализ

В рамках данной работы были изготовлены тестовые образцы (модель, содержащая геометрические элементы: сквозные отверстия, плоские поверхности) с использованием двух наиболее распространенных методов аддитивных технологий, рассмотренных ранее: FDM и LCD.

Для получения результатов сравнительного анализа измерим несколько ключевых геометрических элементов, которые будут влиять на точность дальнейшей сборки и эксплуатации (рис. 3).

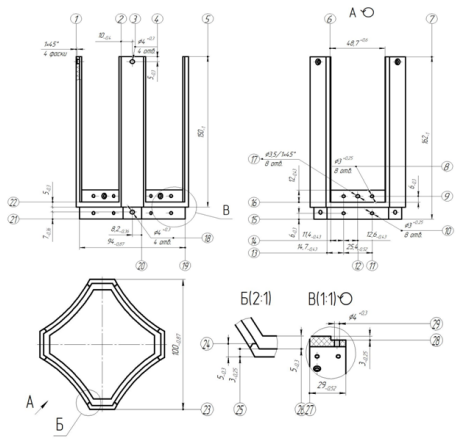


Рис. 3. Контрольная карта

Исходя из данных таблицы, можно сделать следующий вывод: метод LCD обеспечивает более высокую точность и соответствие размерам по

сравнению с FDM. Размеры ответственных элементов, таких как отверстия и толщина стенки, наиболее часто соответствуют ЕСКД при печати методом LCD и входят в поле допуска. Некоторые отклонения размеров могут появиться из-за особенностей технологии печати, таких как усадка, механическая вибрация, температурные деформации, материал и настройки печати.

Таблица

Сравнительный анализ

№ № п/п	Номер размера	Размер, мм	Размер, мм FDM	Размер, мм LCD
1	3	$\emptyset 4.0^{+0,3}$	∅3.9	∅4.0
2	6	$48.7^{+0,6}$	48.4	48.5
3	8	$\emptyset 3.0^{+0,25}$	∅3.0	∅3.0
4	10	$\emptyset 3.0^{+0,25}$	∅2.7	∅3.0
5	16	$12.0_{-0,43}$	11.9	11.7
6	17	∅3.5	∅3.5	∅3.5
7	18	$\emptyset 4.0^{+0,3}$	∅3.9	∅4.0
8	19	$94.0^{-0,87}$	93.5	93.7
9	22	$5.0^{-0,3}$	5.1	5.0
10	23	$100,0^{-0,87}$	99.8	99.5
11	27	$29.0_{-0,52}$	28.9	28.9

Также важно учитывать качество поверхности образцов: при печати методом FDM поверхность детали остается шероховатой, в отличие от образца LCD, и требует дополнительной обработки. При необходимости высокой точности сборки данный параметр будет одним из ключевых, например, для деталей, находящихся в подвижных соединениях.

В ходе выполнения работы был проведён сравнительный анализ геометрической точности детали «Каркас», изготовленной двумя методами послойного синтеза – FDM и LCD. Выбор данных технологий обусловлен их широкой распространённостью, доступностью и принципиальными различиями в физических принципах формообразования.

Для обеспечения возможности изготовления на имеющемся оборудовании исходная 3D-модель была изменена (уменьшена высота) без потери значимых геометрических параметров, влияющих на точность анализа. Изготовлены тестовые образцы, выполнены измерения 11 контрольных размеров, включая диаметры отверстий, размеры валов, толщину стенок и линейные габариты. Полученные результаты показали, что большинство размеров входят в допуск, соответствующий требованиям ЕСКД.

Анализ измерений показал, что метод LCD в большинстве случаев обеспечивает более точное соответствие номинальным размерам и допускам, установленным конструкторской документацией. Отклонения, зафик-

сированные для образцов FDM, связаны с физическими особенностями технологии: усадкой материала, механическими вибрациями при движении печатающей головки, температурными деформациями.

Таким образом, для деталей, к которым предъявляются повышенные требования по геометрической точности и качеству поверхности, метод LCD является предпочтительным. В то же время метод FDM остаётся целесообразным при изготовлении крупногабаритных деталей, не требующих высокой точности, или на начальных этапах прототипирования.

Список литературы

1. Константинов В.В., Соколов Ю.А. Оборудование для аддитивного производства // Аддитивные технологии. – 2020, – № 2. – С. 11–17

2. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство // delprof.ru: Открытая аналитика. 2021. URL: https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-tekhnologiy-3d-pechati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-tekhnologiy-v-proizv/ (дата обращения: 02.04.2026).

3. LCD технология // 3dcrafter.ru: Технологии. 2026. URL: https://3dcrafter.ru/lcd/ (дата обращения: 02.04.2026).

Лямин Б.М.
к.э.н., доцент высшей школы сервиса и торговли
Санкт-Петербургский университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
lyamin_bm@spbstu.ru
Путилова Е.В.
аспирант
Санкт-Петербургский университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
caterina.putilowa@yandex.ru

ПРАКТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ 5С НА ПРИМЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА

Аннотация. В статье обосновывается актуальность внедрения системы «5С» как инструмента бережливого производства для оптимизации рабочего пространства и повышения эффективности труда. Авторами проведено эмпирическое исследование на примере конкретного рабочего места: выполнены последовательные шаги системы (сортировка, соблюдение порядка, содержание в чистоте, стандартизация и совершенствование), проведён анализ временных затрат на типовую задачу до и после изменений. Результаты эксперимента показали сокращение времени выполнения задачи более чем в два раза (с 26 до 12,4 минут). Сделан вывод, что системная организация рабочего места по методике «5С» позволяет минимизировать потери, повысить производительность и создать основу для дальнейшего развития корпоративной культуры непрерывных улучшений.

Ключевые слова: Бережливое производство, система 5С, оптимизация рабочего места, организация труда, эффективность, потери, стандартизация, сортировка, производительность.

Lyamin B.M.
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
of the Higher School of Service and Trade
Peter the Great Saint-Petersburg University
Russia, Saint-Petersburg
lyamin_bm@spbstu.ru
Putilova E.V.
Postgraduate Student
Peter the Great Saint-Petersburg University
Russia, Saint-Petersburg
caterina.putilowa@yandex.ru

PRACTICAL ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF THE 5C SYSTEM USING THE EXAMPLE OF WORKPLACE ORGANIZATION

Abstract. The article substantiates the relevance of implementing the 5S system as a lean manufacturing tool for optimizing the workspace and increasing labor efficiency. The authors conducted an empirical study using a specific workplace as an example: they consistently applied the steps of the 5S system (sort, set in order, shine, standardize, sustain), and analyzed the time spent on a typical task before and after the changes. The experimental results showed a more than twofold reduction in task completion time (from 26 to 12.4 minutes). It is concluded that the systematic organization of the workplace according to the 5S methodology helps minimize losses, increase productivity, and create a foundation for the further development of a corporate culture of continuous improvement.

Keywords: Lean manufacturing, 5S system, workplace optimization, labor organization, efficiency, waste, standardization, sorting, productivity.

В условиях рыночной экономики, характеризующейся частыми и кардинальными переменами, приоритетом для предприятий становится высокое качество продукции. Именно внедрение актуальных систем и подходов в управлении качеством позволяет ведущим игрокам рынка завоевывать и удерживать лидерство. К числу современных концепций специалисты в области управления качеством относят систему «5С». [1] Проблема неорганизованного рабочего пространства напрямую влияет на производительность труда. Производство и эффективность компании во многом зависят от организации ее рабочих мест. Захламлённые и неорганизованные рабочие зоны повышают вероятность ошибок персонала, возникновения «узких мест», травматизма и ухудшения морального климата в коллективе. Чтобы справиться с этими вызовами, руководители всё чаще применяют метод «5S». Внедрение этой системы помогает не только навести порядок, но и обнаружить скрытые проблемы, которые иначе могли бы остаться незамеченными. [1]

Ключевые выгоды от использования «5S» можно обобщить так:

Сортировка/упорядоченность – повышение эффективности за счёт упрощения процессов, снижения нагрузки на сотрудников и уменьшения числа ошибок.

Чистота/содержание в порядке – укрепление здоровья, безопасности и прозрачности, что также способствует росту продуктивности.

Дисциплина/стандартизация – через обучение и воспитание персонала достигается подъём корпоративного духа, что ведёт к улучшению качества труда и жизни, а также повышению рабочих стандартов. [1]

«5S» представляет собой особую методику оптимизации рабочего пространства. Её главная цель – сократить издержки и потери, вызванные нерациональным размещением оборудования и небрежным отношением сотрудников к порядку. Данная система позволяет существенно усилить управляемость операционной зоны, повысить производительность, укрепить корпоративную культуру и сэкономить время. [1]

Эту методику следует рассматривать как неотъемлемую часть корпоративной культуры. Она даёт упорядоченный алгоритм для проектирования, организации и стандартизации рабочей среды. Хорошо структурированные условия труда облегчают работу и выступают мощным мотивирующим фактором. Кроме того, система «5S» положительно влияет на безопасность, результативность труда, помогает сотрудникам идентифицировать себя со своим рабочим местом и, в стратегической перспективе, способствует повышению качества управления в целом. [1]

Методология 5С нацелена на преобразование рабочих зон в организованное и чистое пространство. В нем отсутствуют посторонние предметы, при этом все нужные инструменты и материалы всегда под рукой, что создает условия для высокой производительности. Продуманное расположение каждого предмета гарантирует не только удобство, но и безопасность их применения, позволяя сотрудникам выполнять задачи без лишних затрат времени и усилий, такой метод влечет за собой формирование новой производственной культуры [2–4]. Система 5С выступает одним из эффективных инструментов для создания функциональных рабочих зон для всего персонала и является частью концепции бережливого производства, включает в себя 5 действий: сортировку (удаление с рабочего места всех ненужных предметов), соблюдение порядка (рациональное размещение предметов/инструментов), содержание в чистоте (поддержание рабочего места в надлежащем состоянии), стандартизацию (разработка и стандартизация правил расположения предметов/инструментов) и совершенствование (постоянное улучшение) (рисунок 1) [5, 6].

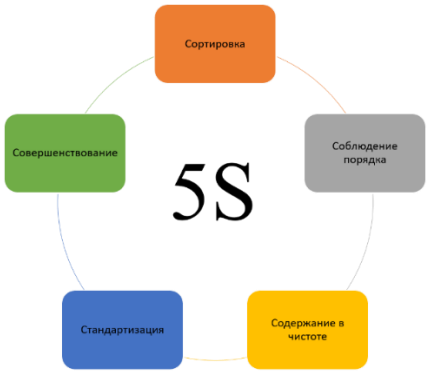


Рис. 1. Система 5S [6]

Чтобы эффективно внедрить методику «5S» на промышленном предприятии, целесообразно сначала запустить пилотный проект на одном рабочем месте. Это позволит отладить процесс внедрения и заранее выявить возможные риски и проблемы. Рассмотрим, как можно применить данный подход в рамках управления подготовкой производства. [7]

Ниже на рисунке 2 представлены ключевые факторы успеха от внедрения системы 5S. [8]

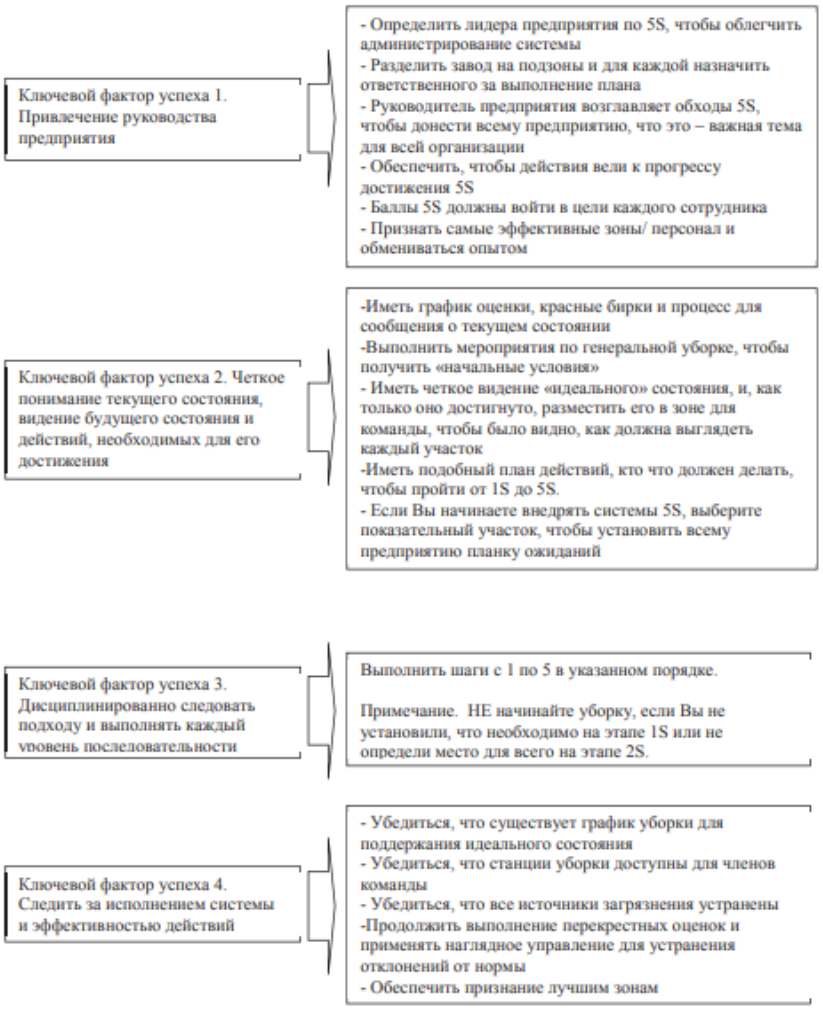


Рис. 2. Развернутое описание ключевых факторов успеха от внедрения системы 5С [8]

Отправной точкой проекта служит приказ, который разрабатывает уполномоченный представитель системы менеджмента качества компании. В этом документе должны быть зафиксированы: состав рабочей группы по внедрению с чётким распределением ролей, календарный график реализации этапов «5S» с указанием ответственных за каждый этап, подписи всех вовлечённых сотрудников. [7]

После оформления приказа необходимо провести обучение руководителей и мастеров производственных подразделений, а также членов команды основам методики «5S». Когда все подготовительные мероприятия

завершены, можно переходить непосредственно к внедрению. Оно осуществляется последовательно в пять шагов: сортировка, организация рационального размещения, уборка, стандартизация и совершенствование. [7]

Целью работы является проведение эмпирического исследования по оптимизации рабочего пространства при помощи инструмента бережливого производства 5С.

Задачи исследования:

- Провести анализ исходного состояния рабочего места.
- Последовательно применить этапы системы 5С.
- Сравнить время выполнения типовой задачи до и после оптимизации.
- Оценить эффективность внедренных изменений.

Методы исследования: Анализ, наблюдение, описание, измерение, эксперимент.

Результаты.

Анализ бизнес-процессов на современных предприятиях демонстрирует, что неоптимизированные процессы генерируют различные виды потерь, которые в свою очередь снижают общую производительность труда и эффективность бизнес-процессов. Устранение потерь требует применения системного подхода, направленного на реорганизацию рабочего пространства. В данном контексте методология «5С» позиционируется как инструментарий, обеспечивающий последовательную и системную оптимизацию. Данный подход представляет собой целостную философию организации рабочего пространства, состоящую из пяти взаимосвязанных принципов (сортировка, рациональное расположение, чистота, стандартизация, совершенствование). Результатом внедрения системы «5С» является формирование устойчивой, самовоспроизводящейся системы, которая минимизирует нагрузку на работника, сокращает время выполнения операций и исключает саму возможность возникновения потерь, связанных с поиском необходимых в процессе предметов [9].

Таким образом, именно системная организация рабочего места, достижимая через последовательное внедрение принципов «5С», создает необходимый базис для последующего развертывания более сложных инструментов повышения эффективности и запуска непрерывного цикла совершенствования в организации. Данный подход трансформирует рабочую среду в активный инструмент управления производительностью.

Рассмотрим рабочее место сотрудника по системе 5С (рисунок 3).



Рис. 3. Рабочее место до применения системы 5S

Периодичность использования предметов/инструментов, находящихся на рабочем столе сотрудника представлена в таблице 1.

Таблица 1

Периодичность использования предметов/инструментов, находящихся на рабочем столе сотрудника

Предметы, которые необходимы в работе постоянно	Ручка, карандаш, блокнот, степлер, принтер, бумага для принтера, рабочий телефон, монитор, мышка, клавиатура, органайзер для бумаг
Предметы, которые нужны иногда	Текстовыделители, ножницы, скрепки, скотч, клей, штангенциркуль, корректор, рабочие журналы, рабочие заявления
Ненужные предметы	Использованные бумаги, маркеры, канцелярский нож

Сотруднику была дана задача: отредактировать стандарт после внесенных изменений. Рассмотрим, сколько времени он затратил на ее выполнение (таблица 2).

Таблица 2

Временные затраты на поставленную задачу до/после внедрения системы

Действие	Затраченное время, мин до внедрения 5С	Затраченное время, мин после внедрения 5С
Найти экземпляр прошлого стандарта с исправлениями	3,5	0,2
Убрать в сторону бумаги, чтобы вытащить клавиатуру и освободить место для мышки	2	0
Открыть стандарт на нужных страницах	0,5	0,5
Открыть файл на компьютере	0,5	0,5
Найти ручку, чтобы делать пометки в документе	1,5	0
Внести изменения в файл	10	10
Найти предыдущий экземпляр, чтобы убедиться, что все исправлено	7	0,2
Отправить файл руководителю	1	1
Итого	26	12,4

Для применения системы 5С выполняется 1 шаг – сортировка. Производится разбор бумаг по местам, по типу, отделение ненужных бумаг. Далее идет следующий шаг – упорядочивание и соблюдение созданного порядка. Для более удобного расположения документов на рабочее место добавляется органайзер для документов, по отсекам которого раскладываются документы по типу. В быстром доступе остается минимальный канцелярский набор, который используется постоянно, и блокнот. Необходимо привить навык возвращать взятый предмет на его место после использования. Далее

следует этап содержание в чистоте. Необходимо выкинуть весь мусор и протереть все поверхности и технику специальными салфетками, в конце рабочего дня необходимо оставлять рабочее место в чистоте.

Далее следует шаг – стандартизация. Для данного рабочего места был разработан следующий стандарт: ручка, карандаш лежат справа, после использования вернуть на место; распечатанные документы складывать по отсекам; документы, которые необходимо отнести на подпись, откладывать на край стола; остальная канцелярия, которая не используется постоянно, находится в первом ящике стола, после использования вернуть на место, рабочее место сотрудника оптимизировано (рисунок 4).



Рис. 4. Рабочее место после применения системы 5S

В шаге совершенствование было обдумано, как еще можно улучшить рабочее место. Для последующего совершенствования будет необходимо: закупить подкатную тумбочку для принтера, чтобы освободить место на столе, а затем на это освободившееся место расположить органайзер для бумаг, тем самым увеличить площадь рабочей поверхности. После оптимизации рабочего пространства дадим сотруднику такую же задачу: отредактировать стандарт после внесенных изменений. Рассмотрим, сколько времени он затратил на ее выполнение (таблица 2).

Выводы. Как видно из таблицы, после оптимизации рабочего пространства, время выполнения стандартной рабочей задачи сократилось примерно в два раза. Этот эксперимент доказывает эффективность организации рабочего места сотрудников по системе 5С.

Список литературы

1. Кузнецова Н.В. Система «5S» как метод стратегического управления качеством / Н.В. Кузнецова // Социосфера. – 2019. – №4. С. 32–36.

2. Туркова А.А., Курбанаева А.Р. Бережливое производство как метод повышения эффективности производства на предприятиях машиностроения // Инновационная наука.– 2017. – №. 12. – С. 123–125.

3. Грачев А.Н., Кисилев И.А. «5S»: от метода к культуре // Стандарты и качество. – 2009. – №. 5. – С. 88–93.

5. Лежнина О.И. Система 5S бережливое производство // Международный академический вестник. – 2020, – №. 6. – С. 39–41.

6. Брацук А.А., Игнатович И.А. Концепция «бережливое производство: система 5s», как метод снижения травматизма в организации // Техносферная безопасность. – 2018. – С. 67–69.

7. Ачкасова А. Система 5S бережливое производство // Молодежь и научно-технический прогресс. – 2021. – С. 4–5.

8. Коротченкова И.О., Подмастерьев К.В., Марков В.В. Методика внедрения метода 5S в процесс управления подготовкой производства / Коротченкова И.О., Подмастерьев К.В., Марков В.В. // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: материалы конференции. – 2019. – С. 377–380,

9. Васильева С.Е., Данилова С.Ю. Методика внедрения инструмента бережливого производства 5S / С.Е. Васильева, С.Ю. Данилова // Молодой ученый. – 2016. – №13(117). – С. 388–392.

10. Лямин Б. М., Янчевская М. Ю., Процюк М. Г. Интеграция инструментов бережливого производства в административные процессы вузов как драйвер удовлетворённости участников образовательного процесса //Вестник Академии знаний. – 2025. – №. 4 (69). – С. 356–361.

Воробьева Я.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
asavrbv@gmail.com
Голушкова У.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
g.uliaha.a@gmail.com
Наджафалиева М.С.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
nadzafalievamaria@gmail.com
Червякова В.К.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikachervyakova06@gmail.com

ПРЕМИИ КАЧЕСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. В условиях глобальной конкуренции премии в области качества выступают не столько знаком отличия, сколько стратегическим инструментом трансформации бизнеса. Данная работа посвящена анализу роли данных премий как катализатора долгосрочной конкурентоспособности предприятий. В статье систематизированы ключевые мировые и российские модели совершенства: от цикла Деминга (PDCA) до Премии Правительства РФ, подчеркивая их эволюцию от контроля продукции к целостной философии управления (TQM). Особое внимание уделяется двойственной природе премий: с

одной стороны, их критерии служат детализированной «дорожной картой» для стратегического аудита, с другой – сам процесс подготовки к конкурсу запускает механизмы самооценки и синхронизации бизнес-процессов. На примере практического опыта отечественных компаний (ПАО «Пигмент», АО «Русская кожа») доказано, что ценность участия заключается в выявлении скрытых резервов и внедрении культуры непрерывных улучшений. Получение премии качества является престижным признанием деятельности организации и её персонала, что способствует достижению устойчивого лидерства на рынке.

Ключевые слова: премии качества, цикл Деминга, конкурентоспособность, совершенствование процессов, качественная продукция.

Vorobyeva Ya.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
asavrbv@gmail.com
Golushkova U.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
g.uliaha.a@gmail.com
Nadjafalieva M.S.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
nadzafalievamaria@gmail.com
Chervyakova V.K.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikachervyakova06@gmail.com

QUALITY AWARDS AS A TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF ENTERPRISES

Abstact. In global competition, quality awards are not so much a mark of distinction as a strategic tool for business transformation. This paper analyzes the role of these premiums as a catalyst for long-term competitiveness of enterprises. The article systematizes key global and Russian models of excellence: from the Deming cycle (PDCA) to the Prize of the Government of Russia, emphasizing their evolution from product control to a holistic management philosophy (TQM). Particular attention is paid to the dual nature of awards: on the one hand, their criteria serve as a detailed roadmap for strategic audit, on the other hand, the process of preparing for the competition itself launches mechanisms for self-assessment and synchronization of business processes. Using the practical experience of domestic companies (Pigment PJSC, Russian Skin JSC), it has been proven that the value of participation lies in identifying hidden reserves and introducing a culture of continuous improvements. The author concludes that integrating quality premium principles into operations is imperative to achieving sustainable market leadership.

Keywords: Quality awards, Deming cycle, competitiveness, process improvement, quality products.

Сегодня, в конкурирующей среде, удержать лидерские позиции сложно. На первый план выходит качество – именно оно является основой конкурентоспособности предприятия. Премии качества мотивируют компании непрерывно развиваться и держать планку среди остальных компаний на рынке. Премии в этой области являются эффективным инструментом для прогресса. Их критерии помогают предприятиям выявлять свои слабые стороны и оптимизировать деятельность. А победа в таком конкурсе – это не просто трофей, а престижное подтверждение профессионализма всего коллектива.

В моём исследовании ставится важный вопрос – какое влияние оказывают премии качества на конкурентоспособность предприятий. Поэтому я считаю необходимым выяснить главные аспекты данного понятия.

Конкурентоспособность предприятия – это способность организации эффективно функционировать на рынке, успешно конкурировать с другими участниками отрасли и достигать своих стратегических целей (например, рост прибыли, увеличение доли рынка, устойчивое развитие) за счёт преимуществ перед конкурентами.

Конкурентоспособность предприятия направлена на удовлетворение потребностей клиентов лучше, чем это делают конкуренты и на эффективное использовании ресурсов – для этого необходимо уметь минимизировать издержки, оптимизировать производственные и управленческие процессы, повышать производительность труда; также конкурентоспособность направлена на высокую адаптацию к изменениям внешней среды (экономические, технологические, правовые, социальные), сохраняя стабильность и развиваясь; создавать и поддерживать конкурентные преимущества – за счёт инноваций, сильного бренда, уникальных технологий, низкой себестоимости, отличного сервиса или других факторов, отличающих компанию от других [1].

В современной конкурентной среде качество давно перестало быть просто характеристикой продукта. Оно трансформировалось в целую философию управления, определяющую успех организации. Премии качества представляют собой не столько награду, сколько эталонную модель бизнес-совершенства**.**

Существует огромное количество премий, но я хочу обратить внимание на самые известные среди них:

Премия Деминга (Deming Prize, Япония) – одна из старейших и самых престижных премий в области качества. Ориентирована на применение статистических методов контроля качества.

Премия Болдриджа (Malcolm Baldrige National Quality Award, США) – национальная премия, основанная на комплексной модели управления, включающей лидерство, стратегию, ориентацию на клиента, измерения, анализ и знания, ориентацию на персонал, управление процессами результаты.

Премия Европейского фонда управления качеством (EFQM Excellence Award, Европа) – европейская премия, основанная на модели совершенства EFQM, которая фокусируется на девяти критериях: лидерство, политика и стратегия, персонал, партнерство и ресурсы, процессы, результаты для потребителей, результаты для персонала, результаты для общества иключевые результаты деятельности.

Премия Правительства Российской Федерации в области качества – российская национальная премия, основанная на критериях, близких к модели EFQM [2].

Также в нашей стране есть и другие премии, в которых предприятия могут стать участником и показать свои способности, например:

Премия Правительства РФ в области качества. Эта награда присуждается компаниям за внедрение высокоэффективных методов менеджмента качества, а также достижение значительных результатов в области качества продукции и услуг, обеспечения их безопасности.

Всероссийская конкурсная программа «Сто лучших товаров России». В ней могут участвовать отечественные предприятия, организации и частные предприниматели различных организационно-правовых форм собственности, а также предприятия и организации стран ТС и СНГ, являющиеся победителями национальных конкурсов в области качества и реализующие свою продукцию на территории России.

Национальная премия «Товар года». Утверждена в 1999 году Национальной торговой ассоциацией при поддержке Московской международной ассоциации и Торгово-промышленной палаты РФ.

Премия «Марка №1 в России» (или «Народная марка»). Была учреждена в 1998 году. Премия отмечает лучших российских производителей товаров и услуг. Награды вручаются в различных категориях, включая товары, услуги и инновации.

Эти премии способствуют популяризации культуры качества, внедрению стандартов (включая ГОСТ Р ИСО 9001) и повышению конкурентоспособности российских товаров.

Но все-таки самой известной и почетной премией качества в России считается Премия Правительства РФ. История Премии Правительства Российской Федерации в области качества берет свое начало в 1996 году. Инициатива учреждения премии была направлена на стимулирование отечественных предприятий к повышению качества выпускаемой продукции и предоставляемых услуг, а также на внедрение современных методов управления качеством. Премия является логическим продолжением и развитием существовавших ранее в СССР систем оценки качества, таких как знак качества.

Однако премия Правительства РФ в области качества ориентирована не только на качество продукции, но и на эффективность управления организацией в целом. Премия Правительства РФ в области качества сыграла

значительную роль в повышении конкурентоспособности российской экономики, стимулировании внедрения современных методов управления качеством и распространении лучших практик. Она стала важным инструментом мотивации для организаций, стремящихся к достижению высоких результатов в области качества [3].

Сущность всех премий заключается в их двойной роли. С одной стороны, они являются формами признания выдающихся достижений в области управления качеством. С другой стороны, их критерии (будь то модель японской Премии Деминга, американской Премии Болдриджа, европейской модели EFQM или российской Премии Правительства РФ) служат детализированной «дорожной картой» для стратегического развития.

В основе этих моделей лежит системный подход, который рассматривает организацию как целостный организм. Качество здесь – это не функция отдела контроля, а результат синергии ключевых элементов, таких как: лидерство и стратегия (четкое видение целей и вовлеченность руководства); процессы и их оптимизация; персонал и его развитие; клиентоориентированность (глубокое понимание потребностей рынка и поиск наиболее эффективных решений для создания той продукции, которую покупатели точно оценят); результаты – это измеримые итоги во всех сферах (финансовые, производственные, социальные).

Таким образом, теоретической основой премий качества является их способность транслировать абстрактные принципы всеобщего управления качеством (TQM) в конкретные, проверяемые критерии оценки. Участие в конкурсе становится мощным инструментом внутреннего аудита, заставляющим компанию провести всестороннюю диагностику, сравнить себя с эталоном и выявить направления для роста. Это превращает премию из цели в средство – практический инструмент развития деятельности предприятия.

Премии в области качества – эффективный инструмент государственного стимулирования организаций, определивших в качестве одной из доминант своего развития курс на повышение качества производимой продукции и оказываемых услуг, важный фактор решения задач по созданию конкурентоспособной экономики и повышению качества жизни граждан [4].

В ходе изучения опыта компаний-участников и лауреатов премий качества (включая анализ, проведенный в рамках курсовой работы) было установлено, что ключевая ценность лежит не в факте получения награды, а в самом процессе подготовки к участию в конкурсе и системных изменениях, которые происходят в данный период.

Были выявлены следующие устойчивые закономерности:

1. Запуск системной самодиагностики. Стремление соответствовать критериям премии вынуждает организацию серьезно рассмотреть проделанную работу и по-новому оценить все аспекты своей деятельности: от согласованности стратегии с операционными целями до эффективности отдельных процессов и удовлетворенности сотрудников. Как отмечают представи-

тели компаний-участниц (например, АО «Русская кожа»), это позволяет выявить «области, требующие улучшения» на основе объективной модели, а не субъективных ощущений.

2. Синхронизация и структурирование деятельности. Работа по критериям премии заставляет различные подразделения говорить на «одном языке». Стратегия, развернутая в конкретные правила и планы, становится понятной и измеримой на всех уровнях. Это подтверждается опытом компаний, которые после участия начинают систематически использовать модель премии для проведения самооценки, интегрируя ее в стратегическое планирование (как, например, ПАО «Пигмент»).

3. Стимулирование культуры непрерывных улучшений (Kaizen). Модели премий, особенно Премия Деминга с ее акцентом на цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act), демонстрирует практику постоянных небольших улучшений. Участие создает среду, где выявление проблем и поиск решений становятся обязанностью каждого сотрудника, а не только руководства.

4. Конкретные измеримые бизнес-результаты. Исследование показывает, что компании, внедряющие подходы премий, демонстрируют прогресс по ключевым показателям: рост удовлетворенности клиентов и персонала, сокращение издержек за счет оптимизации процессов, снижение брака, увеличение производительности и, как следствие, укрепление рыночных позиций.

Иными словами, было установлено, что премия качества работает как катализатор организационной зрелости. Она структурирует усилия по улучшению, обеспечивает обратную связь от независимых экспертов и создает мощный стимул для внутренней трансформации, ведущей к повышению конкурентоспособности.

Теория и исследования находят яркое подтверждение совершенствования деятельности в опыте конкретных российских предприятий:

ПАО «Пигмент» (г. Тамбов). Компания, ставшая дипломантом Премии Правительства РФ, изначально ставила цель не только получить награду, но и проанализировать свои сильные и слабые стороны. Процесс подготовки выступил в роли глубокого стратегического аудита. В результате выявленные в ходе самооценки по модели премии «улучшенные подходы к работе» были напрямую интегрированы в стратегические цели компании на 2021–2025 гг. Премия стала инструментом для переосмысления и систематизации процессов развития.

ООО «Татнефть-АЗС Центр». Предприятие, активно участвующее в различных конкурсах качества (от республиканских до правительственных), рассматривает этот опыт как мотивационный инструмент для команды. По словам представителей компании, участие «мотивирует команду действовать более эффективно и качественно». Это мобилизует коллектив, фокусирует его на общих целях совершенствования и сервиса, что в итоге укрепляет рыночные позиции бренда.

АО «Русская кожа». Для этого старейшего предприятия участие в премии стало возможностью получить ценные рекомендации от экспертной комиссии. Целью была не сама победа, а профессиональная внешняя оценка и диагностика конкурентоспособности. Этот пример подчеркивает роль премии как источника объективной обратной связи, которая позволяет компании, даже имеющей вековую историю, выявить новые точки роста и более эффективно использовать внутренние ресурсы.

Эти примеры иллюстрируют, что независимо от масштаба, отрасли или занятого места в конкурсе, участие в премии качества запускает позитивные изменения. Она действует как полноценная основа для развития, заставляя предприятие перейти от рутинного операционного управления к стратегическому самоанализу и целенаправленным улучшениям, что в конечном счете является сутью повышения конкурентоспособности в долгосрочной перспективе.

В ходе исследования я рассмотрела основные разновидности премий качества, оценила роль премий качества в повышении эффективности и конкурентоспособности организаций, рассмотрела практическую значимость данной темы.

Премии качества не только стимулируют компании к совершенствованию процессов, но и способствуют внедрению лучших практик управления, повышению уровня доверия со стороны потребителей и партнёров. Разнообразие премий качества демонстрирует огромное множество подходов к оценке и признанию достижения высокого стандарта в производстве и предоставлении услуг. Каждая из премий имеет свои уникальные критерии и методики оценки, что позволяет организациям выбирать наиболее подходящие инструменты для самооценки и стратегического развития. Таким образом, премии качества не только фиксируют успехи организаций, но и служат важным ориентиром для других участников рынка, способствуя обмену опытом и внедрению инноваций. В условиях современной экономики, где качество становится ключевым фактором успеха, внедрение практик, связанных с получением премий качества, представляет собой стратегическую необходимость для любой компании, стремящейся к лидерству на рынке.

Список литературы

1. Тихомирова В. Что такое конкурентоспособность / В. Тихомирова Текст: электронный // GD.RU: Журнал «Генеральный Директор»\\ URL: https://www.gd.ru/articles/11801-konkurentosposobnost (дата обращения: 20,04.2026).

2. Премии по качеству // Текст: электронный // KPMS.RU \\ URL: https://www.kpms.ru/General_info/Quality_Awards.htm) (дата обращения: 20,04.2026).

3. ГОСТ Р ИСО 9001 – 2015 Системы менеджмента качества // Текст: электронный // VOENMEH.RU \\ URL: https://www2023.voenmeh.ru/images/docs/otdel-kachestva-obraz/ISO_9001-2015-trebovaniya.pdf (дата обращения: 20,04.2026).

4. ГОСТ Р 59915-2021 Премии Правительства Российской Федерации в области качества. Руководство по проведению конкурса качества // Текст: электронный // STROYINF.RU \\ URL: https://files.stroyinf.ru/Data/769/76934.pdf (дата обращения: 20,04.2026).

Тихомиров А.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
mirof0725bk@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ШУХАРТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты использования контрольных карт Шухарта как одного из основных статистических методов управления качеством. Обоснована актуальность внедрения контрольных карт для мониторинга стабильности технологических процессов на предприятиях машиностроения и приборостроения. Приведена классификация контрольных карт по типу контролируемого параметра и объёму выборки. Описан алгоритм построения контрольных карт средних арифметических значений (X-карта) и размахов (R-карта). На примере обработки валов на токарном станке показан расчёт контрольных границ и интерпретация полученных результатов. Выявлены типовые признаки особых причин вариабельности (выход за контрольные границы, серии, тренды). Сделан вывод о высокой эффективности контрольных карт для своевременного обнаружения разладок процесса и снижения доли дефектной продукции. Предложены рекомендации по интеграции контрольных карт в систему менеджмента качества предприятия в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

Ключевые слова: управление качеством, статистические методы, контрольные карты Шухарта, стабильность процесса, X-карта, R-карта, особые причины вариации, мониторинг, технологический процесс.

Tikhomirov A.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
mirof0725bk@mail.ru

THE USE OF SCHUHART CONTROL CARDS FOR MONITORING THE STABILITY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

Abstact. The article discusses the theoretical and practical aspects of using Schuhart control charts as one of the main statistical methods of quality management. The relevance of the introduction of control maps for monitoring the stability of technological processes at machine-building and instrument-making enterprises is substantiated. The classification of control maps according to the type of controlled parameter and the sample size is given. An algorithm for constructing control maps of arithmetic averages (X-map) and ranges (R-map) is described. Using the example of shaft machining on a lathe, the calculation of control boundaries and the interpretation of the results are shown. Typical signs of special causes of variability (going beyond control boundaries, series, trends) have been identified. It is concluded that control cards are highly effective for timely detection of process failures and reduction of the proportion of defective products. Recommendations on the integration of control cards into the quality

management system of the enterprise in accordance with the requirements of GOST R ISO 9001-2015 are proposed.

Keywords: quality management, statistical methods, Schuhart control maps, process stability, X-map, R-map, special causes of variation, monitoring, technological process.

В современных условиях высококонкурентного рынка качество продукции является ключевым фактором, определяющим успех предприятия. Одним из наиболее действенных инструментов обеспечения стабильности качества являются статистические методы управления процессами (SPC – Statistical Process Control). Среди всего многообразия статистических инструментов контрольные карты Шухарта занимают особое место, поскольку позволяют не только фиксировать текущее состояние процесса, но и прогнозировать его поведение, выявлять моменты разладки и своевременно принимать корректирующие воздействия.

Традиционный подход к управлению качеством, основанный на сплошном контроле готовой продукции, экономически неэффективен и не позволяет предотвратить появление дефектов. В отличие от него, контрольные карты ориентированы на управление процессом в ходе его выполнения, что даёт возможность снизить долю брака и затраты на переделки. Цель данной работы – систематизировать теоретические основы применения контрольных карт Шухарта и продемонстрировать их практическое использование на примере механической обработки деталей.

Теоретические основы контрольных карт Шухарта

Контрольная карта – это графический инструмент, на который наносятся значения статистической характеристики (среднее арифметическое, размах, среднеквадратическое отклонение, число дефектов и т.д.), полученные по выборкам, взятым из процесса в последовательные моменты времени. На карте также отображаются центральная линия (CL), соответствующая среднему значению контролируемой характеристики, и контрольные границы: верхняя (UCL) и нижняя (LCL). Обычно границы располагаются на расстоянии ±3σ (сигм) от центральной линии, что при нормальном распределении обеспечивает вероятность ложной тревоги около 0,27%.

Основное предназначение контрольных карт – разделение вариабельности процесса на два типа:

- **Случайные (обычные) причины** – внутренне присущи процессу, действуют постоянно, устранимы только путём изменения технологии или оборудования.
- **Особые (неслучайные) причины** – возникают из-за конкретных внешних факторов (неправильная настройка станка, износ инструмента, ошибка оператора, смена партии сырья). Их можно выявить и устранить на месте.

Пока на процессе действуют только случайные причины, процесс считается статистически управляемым (стабильным). Появление особой причины означает разладку, и требуется вмешательство.

Классификация контрольных карт

По типу контролируемого признака карты делятся на:

- **Карты по количественным признакам** (измеряемые параметры: длина, диаметр, температура и т.п.) – X-карта, R-карта, S-карта, медианная карта.
- **Карты по альтернативному признаку** (годен/негоден, есть дефект/нет) – p-карта (доля дефектных изделий), np-карта (число дефектных), c-карта (число дефектов на единицу), u-карта (число дефектов на единицу площади).

Наиболее распространённой парой для количественных данных является X-карта (контроль среднего уровня настройки) и R-карта (контроль размаха, характеризующего внутривыборочную изменчивость). Они используются совместно, поскольку стабильность процесса требует постоянства как среднего значения, так и разброса.

Алгоритм построения X-карты и R-карты

1. Собрать не менее 20–25 выборок (подгрупп) объёмом n (обычно n = 3–5) в условиях, когда процесс считается налаженным.
2. Для каждой выборки вычислить среднее арифметическое $\bar{x}_i$ и размах $R_i = x_{max} - x_{min}$.
3. Найти общее среднее $\bar{\bar{x}} = k\sum \bar{x} I$ (k – число выборок) и средний размах $\bar{R} = \sum Rik$
4. Рассчитать контрольные границы:
   - Для X-карты:

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{x} + A_2\bar{R},\ LCL_{\bar{x}} = \bar{x} - A_2\bar{R}$$

где A_2 – коэффициент, зависящий от объёма выборки n (например, для n=5, A_2=0,577).

   - Для R-карты:

$$UCL_R = D_4\bar{R},\ LCL_R = D_3\bar{R}$$

где D_3, D_4 – табличные коэффициенты (для n=5: D_3=0, D_4=2,114).

5. Построить карты, нанести точки $\bar{x}_i$ и R_i, провести центральные линии и границы.
6. Анализировать карты на предмет признаков особых причин.

Практический пример: контроль токарной обработки вала

Рассмотрим процесс точения наружного диаметра вала (номинальный размер 50 мм, поле допуска ±0,1 мм). В течение смены каждые 30 минут отбирали выборку из 5 последовательно обработанных деталей. Результаты измерений (отклонения от номинала в мкм) приведены в таблице.

Таблица

Результаты измерений диаметра вала (отклонения от номинала, мкм)

№ выборки	x1	x2	x3	x4	x5	Сред-нее $\bar{x}_i$	Раз-мах R_i
1	12	8	15	9	11	11,0	7
2	10	13	7	14	12	11,2	7
3	9	11	10	8	12	10,0	4
4	13	10	14	9	11	11,4	5
5	8	12	10	7	13	10,0	6
6	14	11	12	10	9	11,2	5
7	11	13	8	12	10	10,8	5
8	15	14	12	13	16	14,0	4
9	9	7	10	8	11	9,0	4
10	10	9	11	12	8	10,0	4

Рассчитаем общие параметры:

$$\bar{x} = \frac{11{,}0 + 11{,}2 + 10{,}0 + 11{,}4 + 10{,}0 + 11{,}2 + 10{,}8 + 14{,}0 + 9{,}0 + 10{,}0}{10} = 10{,}86 \text{ мкм}$$

$$\bar{R} = \frac{7 + 7 + 4 + 5 + 6 + 5 + 5 + 4 + 4 + 4}{10} = 5{,}1 \text{ мкм}$$

Для n=5: $A_2 = 0{,}577$; $D_3 = 0$; $D_4 = 2{,}114$.

Границы X-карты:

$$UCL_{\bar{x}} = 10{,}86 + 0{,}577 \cdot 5{,}1 = 10{,}86 + 2{,}94 = 13{,}80 \text{ мкм}$$

$$LCL_{\bar{x}} = 10{,}86 - 2{,}94 = 7{,}92 \text{ мкм}$$

Границы R-карты:

$$UCL_R = 2{,}114 \cdot 5{,}1 = 10{,}78 \text{ мкм}, \quad LCL_R = 0$$

На рисунке показаны построенные контрольные карты.

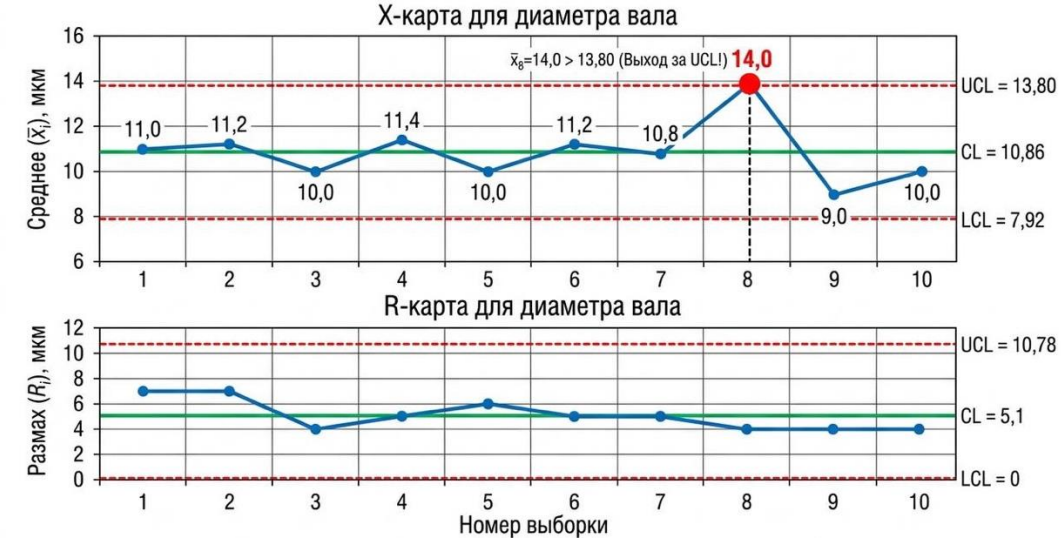


Рис. X-карта и R-карта для диаметра вала

Интерпретация результатов

Выход точки на X-карте за верхнюю контрольную границу (выборка №8) свидетельствует о наличии особой причины вариабельности. При анализе журнала работы станка было установлено, что в момент отбора восьмой выборки произошло кратковременное повышение температуры в зоне резания из-за затупления резца. Это привело к смещению среднего диаметра вверх. Оператор заменил режущий инструмент, и последующие выборки (№9, №10) снова укладываются в контрольные границы.

Важно отметить, что R-карта не показывает нарушений – размах вариации внутри выборок оставался стабильным. Это означает, что кратковременный сдвиг настройки не повлиял на рассеяние размеров. Если бы вышли за границы точки на R-карте, это указывало бы на увеличение случайной изменчивости (например, биение шпинделя, люфты).

Дополнительные признаки особых причин, которых не наблюдалось в данном примере, но которые следует отслеживать:

- Серия из 7 и более точек подряд, с одной стороны, от центральной линии.
- Тренд (монотонное возрастание или убывание 7 и более точек).
- Периодические колебания.
- Приближение точки к контрольной границе (в зоне 2σ–3σ).

Таким образом, использование X-карты позволило оперативно выявить момент разладки процесса и предотвратить выпуск потенциально дефектных деталей (поскольку среднее выборки №8, равное 14 мкм, ещё не выходило за пределы допуска ±100 мкм, но при сохранении тренда брак стал бы неизбежен).

Экономическая эффективность применения контрольных карт

Внедрение контрольных карт Шухарта даёт предприятию следующие преимущества:

- Снижение доли дефектной продукции на 30–50% за счёт своевременной наладки.
- Уменьшение затрат на сплошной контроль – переход к выборочному.
- Повышение предсказуемости сроков выполнения заказов.
- Создание базы для сертификации системы менеджмента качества по ИСО 9001.

Для успешного применения необходимо обучить персонал основам статистического мышления, выбрать критические характеристики процесса (CTQ – Critical to Quality), регулярно пересчитывать контрольные границы при улучшении процесса.

Контрольные карты Шухарта являются мощным и в то же время простым в использовании инструментом для мониторинга стабильности технологических процессов. Они позволяют отделить случайную вариабельность от сигналов о разладке, давая возможность вмешаться в процесс до того, как будет произведён брак. Приведённый практический пример наглядно демонстрирует, как выход среднего значения за контрольные границы помогает выявить особую причину (износ инструмента) и принять корректирующее действие.

В условиях цифровой трансформации производства контрольные карты легко интегрируются в автоматизированные системы сбора данных (SCADA, MES), что повышает оперативность управления качеством. Рекомендуется включать построение и анализ контрольных карт в регламенты производственных подразделений и использовать их как часть постоянного улучшения в соответствии с циклом PDCA.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2021. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. – Введ. 2022-02-01. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 48 с.

2. Шухарт У.А. Экономический контроль качества промышленной продукции / У.А. Шухарт ; пер. с англ. А.А. Барсуковой ; под ред. И.И. Елисеевой. – Москва: Статистика, 2009. – 356 с. – ISBN 978-5-902897-15-6.

3. Уилер Д. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д. Уилер, Д. Чамберс ; пер. с англ. – Москва: Альпина Паблишер, 2018. – 490 с. – ISBN 978-5-9614-1492-8.

4. Леонов О.А. Статистические методы управления качеством: учебное пособие для вузов / О.А. Леонов, Н.Ж. Шкаруба. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 312 с. – ISBN 978-5-7038-5423-5.

5. Ефимов В.В. Статистические методы обработки данных и управления качеством / В.В. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – 180 с. – ISBN 978-5-9795-1892-7.

6. Адлер Ю.П. Управление качеством. Часть 1. Семь простых методов / Ю.П. Адлер, В.Л. Шпер. – Москва: Стандарты и качество, 2018. – 128 с. – ISBN 978-5-94914-079-1.

Шпак С.А.
студент
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург,
spak.97@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ШУХАРТА ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация. Данная работа посвящена применению контрольных карт Шухарта для мониторинга технологических процессов в фармацевтическом производстве. Статья демонстрирует, как эти карты способствуют своевременному обнаружению отклонений в параметрах процесса, предотвращая выпуск несоответствующей продукции. В статье представлены различные типы контрольных карт, подходящие для разных видов данных, а также детальный алгоритм их создания. На примере контроля силы прессования таблеток показано, что выход точки за установленные контрольные границы является индикатором износа оборудования и позволяет избежать производства брака.

Ключевые слова: контрольные карты Шухарта, статистическое управление процессами, фармацевтическое производство, фармацевтика, стабильность процессов, мониторинг оборудования, GMP, SPC.

Shpak S.A.
Student
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint-Petersburg
spak.97@mail.ru

APPLICATION OF SHEWHART CONTROL CHARTS FOR MONITORING THE STABILITY OF A TECHNOLOGICAL PROCESS IN PHARMACEUTICAL MANUFACTURING

Abstact. This article examines the use of Shewhart control charts to monitor pharmaceutical manufacturing processes. It demonstrates how these charts facilitate the timely detection of process parameter deviations, preventing the release of nonconforming products. The paper presents various types of control charts suitable for different types of data, as well as a detailed algorithm for their creation. Using tablet compression force monitoring as an example, it is shown that a point exceeding established control limits is an indicator of equipment wear and tear, preventing the production of defective products.

Keywords: Shewhart control charts, statistical process control, pharmaceutical manufacturing, pharmaceuticals, process stability, equipment monitoring, GMP, SPC.

В фармацевтической отрасли качество конечного продукта неразрывно связано со стабильностью ключевых технологических параметров, включая температуру, давление, скорость смешивания, массу таблетки и дозировку активного вещества. Любое, даже незначительное, отклонение этих показателей чревато производством несоответствующей продукции.

Существующая сегодня на российских фармацевтических предприятиях практика контроля качества, ориентированная на проверку готовой продукции, имеет существенный недостаток: выявление дефектов происходит уже после завершения производственного цикла. Это приводит к неизбежным потерям, поскольку бракованная продукция не подлежит переделке и идет на утилизацию после помещения в карантинную зону.

Современным решением проблемы поддержания стабильности процессов в современной практике производства, успешно применяемым в автомобильной промышленности уже много лет, является статистическое управление процессами (SPC – Statistical Process Control). Один из основных инструментов SPC – контрольные карты Шухарта [1].

Контрольные карты Шухарта являются фундаментальным инструментом статистического управления процессами (SPC). Они представляют собой графики, на которых отображаются значения измеряемых параметров процесса во времени.

Данная статья ставит своей целью продемонстрировать применение контрольной карты Шухарта на фармацевтическом производстве для предотвращения выпуска некондиционной продукции.

Требования к статистическому управлению процессами прямо закреплены в отраслевых нормативных документах. Например, таких как:

-ICH Q10 «Система фармацевтического качества». Документ требует поддерживать «состояние статистического контроля» процесса. Это означает, что вариабельность процесса должна быть предсказуемой во времени, а не случайной [2].

-ICH Q1E «Оценка данных о стабильности». Документ предписывает применять статистические методы для установления срока годности лекарственных препаратов [3].

-ГОСТ Р ИСО 9001-2015, пункт 9.1.3 требует анализировать данные о качестве, рекомендуя использовать статистические методы [4].

Таким образом, применение контрольных карт – это не просто удобный инструмент, его применение позволяет подтвердить, что предприятие управляет качеством на основе научного подхода.

Контрольная карта в общем виде представляет собой график, на котором в хронологическом порядке отображаются значения параметра процесса. На график наносятся три линии:

1. Центральная линия (CL) – среднее значение параметра.

2. Верхняя контрольная граница (UCL) – среднее + 3σ.
3. Нижняя контрольная граница (LCL) – среднее – 3σ. [1]

Пределы ± 3σ определены, потому что при нормальном законе распределения за эти пределы выходит только 0,27% точек. Когда точка выходит за границы – это считывается как значимый сигнал о выходе процесса из зоны управляемости [1].

Ключевое отличие, которое необходимо подчеркнуть, состоит в том, что контрольные границы не являются границами спецификации. Пределы спецификации задает инженер-технолог, например, масса таблетки должна составлять от 480 до 520 мг. Контрольные границы же рассчитываются по данным процесса и показывают, насколько процесс стабилен, например, масса таблетки обычно составляет от 495 до 512 мг – это контрольные границы.

Классификация основных типов контрольных карта описана в Таблице 1 [1, 5].

Таблица 1

Типы контрольных карт Шухарта

Тип карты	Вид данных	Пример применения
Средних и размахов ($\bar{x}$-R)	Количественные; n=3–5	Контроль температуры в реакторе (3 замера с интервалом 15 минут)
Средних и стандартных отклонений ($\bar{x}$-S)	Количественные, n>=6	Контроль проб однородности смеси (10 проб)
Индивидуальных значений и скользящих размахов (I-MR)	Количественные, непрерывные; n=1	Контроль показателей таблетпресса (1 раз в час)
Доля дефектных единиц (p-карта)	Качественные	Доля поврежденных ампул (брак/не брак)
Число дефектов (c-карта)	Качественные	Количество дефектов печати на одном блистере

Практическая демонстрация использования контрольных карт будет проведена на примере контроля усилия прессования таблеток. Усилие, с которым таблетпресс сжимает порошковую массу, является критическим параметром, влияющим на твердость, распадаемость и другие важные характеристики таблетки. Отклонение этого параметра может быть вызвано износом пуансонов и матриц, изменением свойств сырья или другими факторами. Для примера произведено построение карты индивидуальных значений и скользящих размахов (I-MR карта) для оценки состояния работы роторного таблетпресса, использующегося для прессования гранулята в таблетки. Всего собрано 20 измерений за 20 часов работы оборудования.

В таблице 2 представлены исходные данные для построения контрольной карты.

Таблица 2

Данные для построения контрольной карты

Час	Усилие, кН	Час	Усилие, кН
1	8,2	11	8,6
2	8,1	12	8,7
3	8,3	13	8,5
4	8,1	14	8,8
5	8,2	15	8,9
6	8,4	16	8,7
7	8,1	17	9,0
8	8,3	18	9,1
9	8,5	19	9,2
10	8,4	20	9,0

Поэтапно произведен расчет параметров для построения контрольной карты в программе Microsoft Excel:

1. Расчёт среднего значения ($\bar{x}$):

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{8{,}1 + 8{,}2 + \cdots 9{,}0}{20} = 8{,}55\text{kH}$$

2. Расчет скользящих размахов (mR):

$$mR_i = |x_i - x_{i-1}|$$

$$mR_2 = |8{,}1 - 8{,}2| = 0{,}1$$

$$mR_3 = |8{,}3 - 8{,}1| = 0{,}2$$

$$mR_4 = |8{,}1 - 8{,}3| = 0{,}2$$

$$mR_{20} = |9{,}0 - 9{,}2| = 0{,}2$$

3. Расчет среднего скользящего размаха ($m\bar{R}$):

$$m\bar{R} = \frac{(0{,}1 + 0{,}2 + 0{,}2 \ldots + 0{,}2)}{19} = 0{,}17\text{kH}$$

4. Расчет контрольных границ для I-карты:

$$CL = \bar{x} = 8{,}55\text{kH}$$

$$UCL = \bar{x} + 2{,}66 \times m\bar{R}$$

$$UCL = 8{,}55 + 2{,}66 \times 0{,}19 = 9{,}031\text{кН}$$

$$LCL = \bar{x} - 2{,}66 \times m\bar{R}$$

$$LCL = 8{,}55 - 2{,}66 \times 0{,}19 = 8{,}079\text{кН}$$

Коэффициент 2,66 является константой для расчета контрольных границ по скользящим размахам при n=1. Контрольные границы карты рассчитываются по формуле $\bar{x} \pm 2{,}66 \times m\bar{R}$, что эквивалентно $\bar{x} \pm 3\sigma$ для индивидуальных значений. [5]

Значения, полученные в ходе расчетов, наносятся на контрольную карту: фактические усилия по часам (показатели оборудования), центральная линия, (CL), верхняя контрольная граница (UCL), нижняя контрольная граница (LCL). Контрольная карта приведена на рисунке.

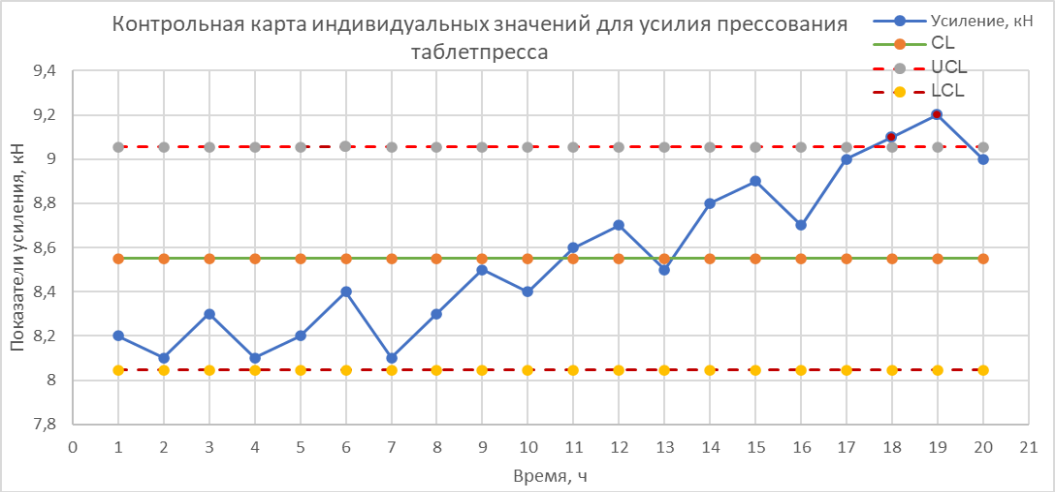


Рис. I-карта работы роторного таблетпресса

На карте видно, что период стабильной работы роторного таблетпресса приходится с 1 по 17 часы. Все точки находятся в контрольных границах, что говорит о том, что процесс можно считать статистически управляемым.

Начиная с 18-го часа наблюдается превышение верхней контрольной границы (усилие 9,1 кН при UCL = 9,031 кН). На 19-м часу значение составляет 9,2 кН, что явно выходит за контрольные пределы.

Рост усилия прессования свидетельствует об увеличении сопротивления материала. Наиболее вероятная предполагаемая причина – износ пуансонов таблетпресса. Оборудование продолжает работать, качество таблеток может пока соответствовать спецификации, однако тенденция указывает на скорую необходимость технического осмотра и обслуживания данной единицы оборудования.

Выход точки за контрольные пределы является сигналом о разладке процесса. Службе технического обслуживания следует запланировать замену пуансонов в следующее технологическое окно. Это позволит предотвратить внеплановый простой оборудования и выпуск несоответствующей продукции. В результате проведенного анализа становится очевидно, что контрольная карта позволяет обнаружить изменение состояния оборудования еще до выхода параметров за пределы спецификации.

В статье было рассмотрено практическое применение контрольных карт Шухарта на фармацевтическом производстве. Продемонстрировано, как контрольные карты позволяют своевременно обнаруживать отклонения технологических параметров задолго до появления несоответствующей продукции.

Данный алгоритм применим в условиях любого фармацевтического предприятия без дополнительных затрат на узкоспециализированное программное обеспечение. Своевременно обнаружив выход процесса за контрольные границы, возможно предотвратить выпуск некондиционной продукции и внеплановые простои оборудования.

Таким образом, применение контрольных карт Шухарта на фармацевтическом производстве является мощным инструментом для проактивного управления качеством. Они позволяют перейти от реактивного контроля к превентивному, обеспечивая стабильность технологических процессов, снижая вероятность выпуска брака и, как следствие, повышая экономическую эффективность производства и доверие к выпускаемой продукции. Внедрение принципов статистического управления процессами, в частности, использование контрольных карт, является неотъемлемой частью современных систем управления качеством, таких как GMP (Good Manufacturing Practice), и способствует достижению высоких стандартов в фармацевтической отрасли.

Список литературы

1. Шухарт У. А. Экономический контроль качества промышленной продукции / У. А. Шухарт ; пер. с англ. – Москва : Стандартгиз, 1959. – 267 с.

2. ICH Harmonised Tripartite Guideline Q10, Pharmaceutical Quality System. – 2008. – URL: https://database.ich.org/sites/default/files/Q10%20Guideline.pdf (дата обращения: 20,04.2026).

3. ICH Harmonised Tripartite Guideline Q1E. Evaluation of Stability Data. – 2003. – URL: https://database.ich.org/sites/default/files/Q1E%20Guideline.pdf (дата обращения: 20,04.2026).

4. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Введ. 2016-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 33 с. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200124394 (дата обращения: 20,04.2026).

5. ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. – Введ. 2016-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 46 с. – URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=243525 (дата обращения: 25.04.2026).

Абедалхуссайн Ахмед Али
аспирант
НИТУ МИСИС
Москва, Россия
m2000009@edu.misis.ru
Ляпунцова Е.В.
д.т.н., профессор кафедры «Инновационное предпринимательство»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
lev86@bmstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ ВРЕДОНОСНЫХ ПРОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация. В работе рассматривается задача визуализации и классификации вредоносных программ на основе их представления в виде изображений. В качестве данных используется набор Malimg, содержащий 25 семейств и 9339 изображений, для которого выполняется паспортирование, контроль качества и анализ дубликатов. Для исключения завышения качества при оценке предлагается протокол разбиения данных с учетом групп дубликатов, обеспечивающий отсутствие утечек между обучающими и тестовыми подмножествами. Сравниваются классический метод на признаках градиента и текстуры, а также базовые глубокие нейронные сети переноса обучения. Дополнительно исследуется многоканальная схема визуализации одного образца, включающая базовую карту, карту локальной энтропии и частотную карту. Для оценки прикладной надежности вводится протокол проверки устойчивости, основанный на параметризованных искажениях входных изображений, имитирующих обфускацию, и метрике относительного сохранения качества. Показано, что на чистых данных базовые модели достигают высоких значений усредненной по классам F-меры, тогда как простое объединение нескольких представлений без специализированного механизма согласования не повышает устойчивость и в ряде режимов приводит к ее снижению. Полученные результаты уточняют границы применимости многоканальной визуализации и формируют основу для дальнейшего развития методов устойчивого распознавания вредоносных программ.

Ключевые слова: вредоносные программы; компьютерное зрение; визуализация двоичных данных; глубокие нейронные сети; классификация по семействам; устойчивость к искажениям; перекрестная проверка.

Abedalhussain Ahmed Ali
Postgraduate Student
NUST MISIS
Russia, Moscow
m2000009@edu.misis.ru
Lyapuntsova. E.V.
Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Innovative Entrepreneurship
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
lev86@bmstu.ru

APPLICATION OF COMPUTER VISION METHODS FOR MALWARE VISUALIZATION AND CLASSIFICATION USING DEEP NEURAL NETWORKS

Abstact. This paper addresses malware visualization and family classification by representing binary samples as images. The study uses the Malimg dataset (25 families, 9,339 images) and includes dataset profiling, quality checks, and duplicate analysis. To avoid inflated performance estimates, a split protocol that accounts for duplicate groups is employed, ensuring no leakage between training and test partitions. We compare a classical baseline based on gradient- and texture-related descriptors with transfer-learning deep neural networks. In addition, we investigate a multi-view visualization scheme for a single sample that combines a base byte-map image with a local entropy map and a frequency-domain map. To assess practical reliability, we introduce a robustness evaluation protocol based on parameterized input distortions that mimic obfuscation effects and use a relative performance preservation metric. Results show that baseline deep models achieve high macro-averaged F1 on clean data, whereas naive fusion of multiple views without a dedicated alignment and selection mechanism does not improve robustness and may reduce it under certain distortion regimes. The reported findings clarify the applicability limits of multi-view malware visualization and provide a reproducible foundation for developing more robust malware recognition pipelines.

Keywords: malware; computer vision; binary data visualization; deep neural networks; malware family classification; robustness to distortions; cross-validation.

Рост числа вредоносных программ поддерживается автоматизированной сборкой вариантов, переупаковкой и обфускацией, из-за чего сигнатурные средства защиты начинают отставать от темпа появления новых образцов. Практика эксплуатации показывает, что классические конвейеры анализа, основанные на ручном проектировании признаков, упираются в трудоемкость извлечения информативных характеристик и ограниченную переносимость на новые семейства. Современные обзоры подчеркивают, что методы глубокого обучения снижают зависимость от ручной инженерии признаков, однако остаются проблемы воспроизводимости на разных наборах данных и недостаточной объяснимости решений моделей [1, 2].

Преобразование исполнимых файлов в изображения переводит задачу распознавания в область компьютерного зрения, где накоплены устойчивые архитектуры и проверенные процедуры обучения. Отображение двоичного содержимого в полутоновую карту позволяет сохранить локальные структурные закономерности, связанные с повторяющимися блоками кода и данных, а также использовать сверточные сети и перенесенное обучение. Работы, ориентированные на визуализацию структуры исполнимых форматов, показывают, что явное выделение секций и их распределения в изображении может повышать информативность представления для классификации семейств [3]. Параллельно развиваются модели, встраивающие механизмы внимания в глубокие сети и демонстрирующие высокое качество на изображениях вредоносных программ при контроле дисбаланса классов [4].

Сопротивляемость моделей искажениям входных данных приобретает прикладное значение, поскольку реальные вредоносные программы нередко модифицируются средствами упаковки и маскирования, изменяя внешние признаки при сохранении функциональности. Исследования по устойчивости визуальных подходов отмечают, что определенные преобразования могут существенно снижать качество сверточных сетей, а альтернативные дескрипторы иногда сохраняют работоспособность лучше при росте доли искаженных участков [5]. Аналитические обзоры также связывают снижение обобщающей способности с воздействием состязательных искажений и подчеркивают необходимость отдельного протокола проверки устойчивости наряду с оценкой на «чистом» тесте [1].

Эксперименты выполняются на наборе изображений Malimg, содержащем 25 семейств и 9339 файлов, опубликованном в виде открытого ресурса [6]. Создание паспортов данных включает контроль читаемости файлов, анализ дисбаланса по классам и выявление дубликатов по хэш-суммам, после чего формируется разбиение без утечек между обучающей и тестовой частями. Сравнение методов строится по единому протоколу перекрестной проверки: рассматриваются классический базовый подход на признаках градиента и текстуры, а также глубокие нейронные сети переноса обучения, обученные на визуализациях двоичного содержимого. Проверка устойчивости дополняется параметризованными искажениями изображений и метрикой относительного сохранения качества, позволяющей сравнивать деградацию моделей при усилении воздействия.

Цель исследования состоит в воспроизводимой оценке методов компьютерного зрения для визуализации и классификации вредоносных программ с акцентом на качество распознавания и устойчивость к искажениям входа. Для достижения цели решаются задачи: 1) подготовить набор данных с контролем дубликатов и корректным разбиением; 2) реализовать и сравнить базовые и нейросетевые методы классификации на единых разбиениях; 3) провести проверку устойчивости по заданным типам и уровням искажений с анализом относительного сохранения качества. Представление результатов включает таблицы метрик по перекрестной проверке и графики устойчивости для выбранных воздействий.

Материалы исследования и подготовка данных. Набор изображений Malimg содержит 9339 образцов, распределенных по 25 семействам вредоносных программ, и широко применяется как эталон для проверки методов классификации по визуальным представлениям двоичного кода [7]. Распределение числа изображений по семействам характеризуется выраженной неравномерностью, что наглядно видно на рисунке 1 и требует аккуратного выбора метрик и протокола разбиения. Сводные характеристики набора, результаты контроля читаемости файлов и ключевые показатели состава данных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики набора данных и контроль качества файлов

Показатель	Значение
Число изображений	9339
Число семейств (классов)	25
Корректно читаемых файлов	9339
Проблемных файлов	0
Максимальный размер класса	2949 (Allaple.A)
Минимальный размер класса	80 (Skintrim.N)
Медиана размера класса	159
Число групп дубликатов (по md5)	260
Число файлов, входящих в дубликаты	1155
Разбиение на 5 фрагментов (число объектов)	0: 1855; 1: 1897; 2: 1836; 3: 1914; 4: 1837
Утечки дубликатов между фрагментами	0

Дисбаланс по семействам проявляется в доминировании отдельных классов при наличии малочисленных групп, что влияет на интерпретацию «простой» точности. Максимальный размер класса достигает 2949 изображений для семейства Allaple.A, минимальный составляет 80 изображений для Skintrim.N, а медианный размер класса равен 159. Гистограмма (рис. 1) подчеркивает, что обучение модели без учета дисбаланса повышает риск смещения в сторону частотных семейств и ухудшает качество на редких классах.

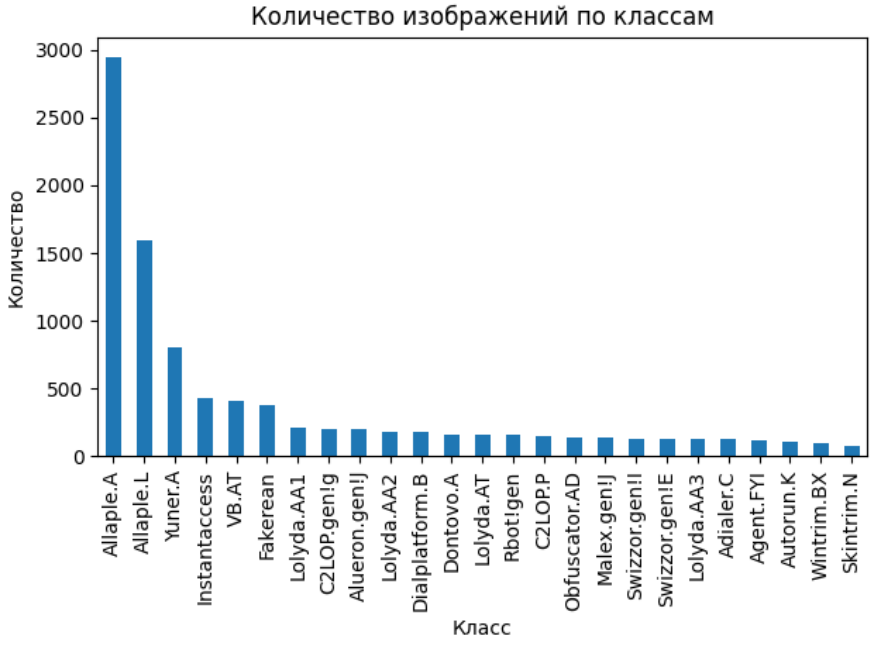


Рис. 1. Распределение числа изображений по семействам вредоносных программ в наборе данных

Разнородность исходных изображений по геометрии и масштабу потребовала унификации входа перед обучением моделей. Преобразование включало приведение изображений к единому формату по каналам, симметричное дополнение до квадратной формы и последующее изменение размера до фиксированного разрешения, обеспечивающего совместимость с типовыми архитектурами глубоких нейронных сетей. Дополнительно сохранялась информация, необходимая для воспроизводимости, в виде паспорта набора с путями к файлам, метками классов и вычисленными служебными атрибутами.

Поиск точных дубликатов выполнялся по хэш-суммам файлов, что позволило выявить 260 групп повторяющихся изображений и 1155 файлов, входящих в такие группы. Публикации по качеству данных показывают, что наличие дубликатов и близких повторов способно приводить к утечке информации между обучением и тестом, завышая оценку качества и снижая надежность сравнения методов [10, 11]. Выявленные повторы учитывались при разбиении, чтобы исключить попадание идентичных изображений в разные части данных.

Разбиение на обучающие и тестовые подвыборки строилось по схеме перекрестной проверки с сохранением долей классов и одновременным запретом пересечения групп дубликатов между фрагментами. Реализация опиралась на стратифицированное разбиение с непересекающимися группами, где роль группы задавалась хэш-идентификатором изображения, а число фрагментов фиксировалось равным пяти [9].

Загрузка набора в вычислительную среду выполнялась напрямую из репозитория Kaggle с использованием официального интерфейса командной строки и аутентификации через файл ключа доступа. Процедура получения файла ключа и размещения учетных данных описана в документации по интерфейсу Kaggle, что обеспечивает воспроизводимую настройку окружения без ручного копирования набора данных [8]. Хранение промежуточных результатов предобработки организовывалось через отдельные файлы-артефакты (паспорт, таблица размеров классов, список дубликатов и файл разбиений), что упрощает повторение экспериментов и контроль корректности конвейера.

Методы визуализации и классификации вредоносных программ. Базовая карта двоичного содержимого строится последовательным разворачиванием байтов исполнимого файла в полутоновое изображение, где значение байта интерпретируется как яркость пикселя. Предобработка приводит изображения к единому формату: выполняется преобразование к одному каналу, симметричное дополнение до квадратной формы и масштабирование до фиксированного размера, обеспечивающего сопоставимый вход для всех моделей; примеры таких изображений показаны на рисунке 2. Сохранение исходных путей и меток в паспорте набора позволяет воспроизводимо пересчитывать любые производные представления при изменении параметров визуализации.

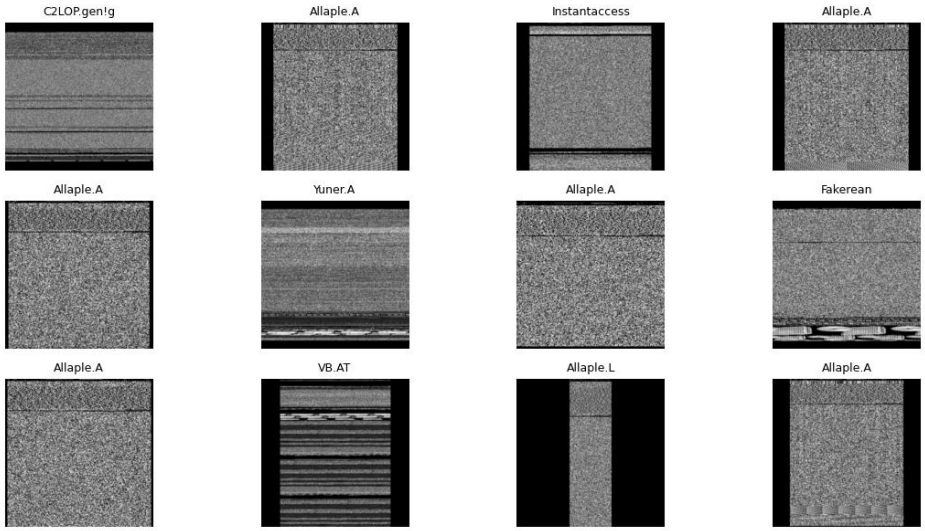


Рис. 2. Примеры изображений вредоносных программ после приведения к единому формату

Выбор параметров отображения двоичных данных в двумерную форму влияет на сохраняемую структуру файла, поскольку изменение «ширины строки» при разворачивании эквивалентно смене способа группировки байтов в пространстве изображения. При фиксированной ширине часть локальных закономерностей может теряться из-за непредсказуемого обрезания или переуплотнения участков, а сами изображения получают искусственный гиперпараметр, не связанный с семантикой вредоносного кода [13]. Публикации, анализирующие визуальную классификацию по секциям исполнимого формата, дополнительно подчеркивают роль выравнивания ширины при масштабировании, поскольку изменение ширины изменяет текстуру и взаимное расположение крупных блоков [14].

Карта локальной энтропии отражает «неупорядоченность» байтов в окрестности и выделяет участки, где распределение значений ближе к равномерному, что характерно для сжатых или зашифрованных фрагментов. Расчет выполняется по блокам фиксированного размера: для каждого блока строится частотное распределение яркостей, далее вычисляется энтропия и нормируется к единому диапазону, после чего карта растягивается до размера исходного изображения. Сопоставление базовой карты и карты локальной энтропии на одном образце приведено на рисунке 3.

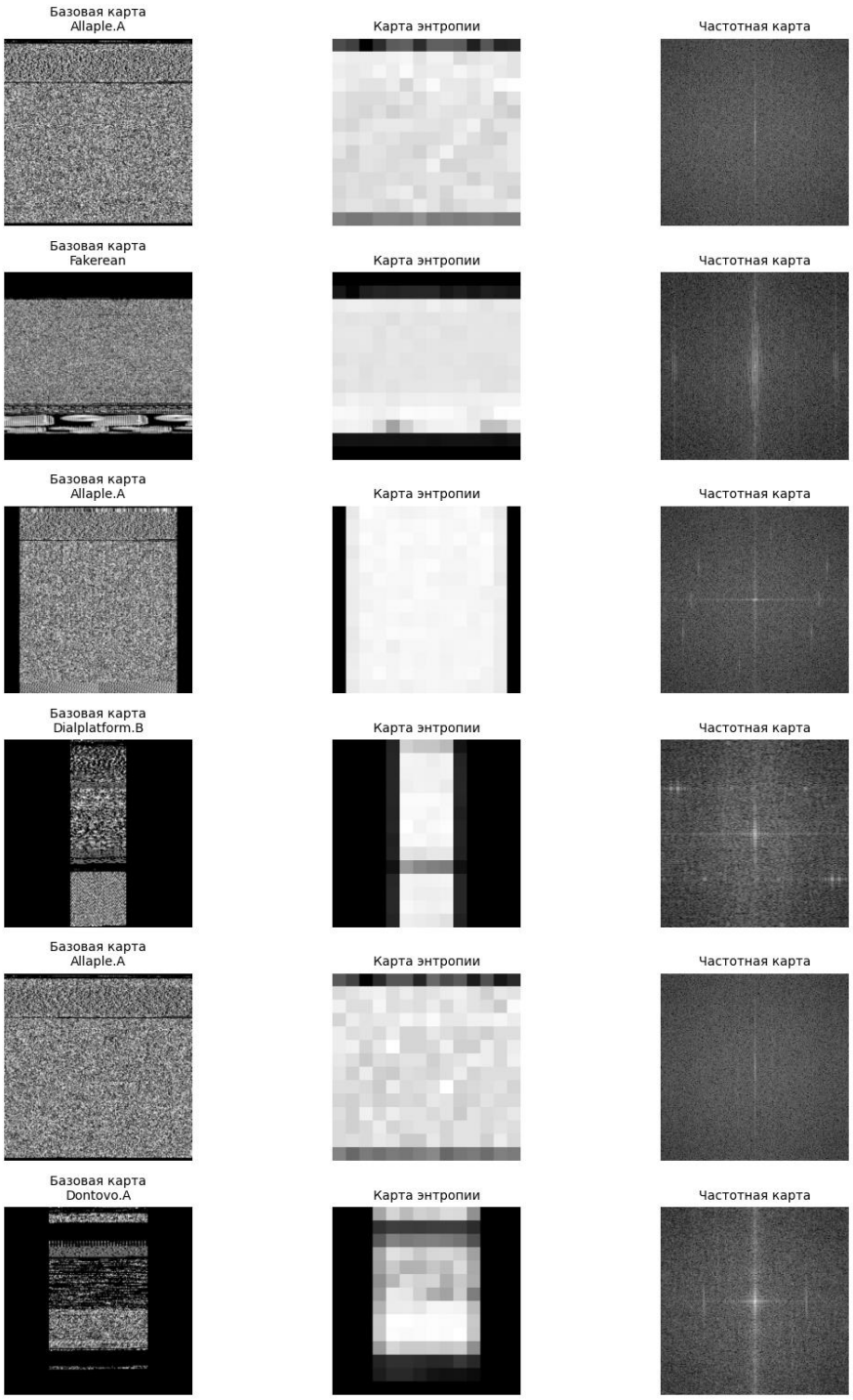


Рис. 3. Пример трех визуальных представлений одного образца вредоносной программы

Частотная карта формируется преобразованием изображения в область пространственных частот, после чего используется логарифмическая амплитуда спектра как «портрет» периодичностей и регулярных структур. Такой подход согласуется с идеей частотной визуализации вредоносных программ, где перенос в частотную область позволяет подчеркнуть устойчивые паттерны, слабо заметные в исходной яркостной карте [12]. Комплект из

трех представлений – базовой карты, карты локальной энтропии и частотной карты – используется как основа для последующего сравнения схем классификации.

Классификационный блок включает два семейства методов: классический и нейросетевой. Классический вариант опирается на признаки формы и текстуры изображения, где градиентные дескрипторы фиксируют направленные перепады яркости, а локальные текстурные коды описывают микроструктуру соседствующих пикселей; итоговая классификация выполняется линейной моделью с регуляризацией. Нейросетевой вариант реализуется сверточными архитектурами переноса обучения, где предобученные на больших наборах изображений сверточные слои используются как универсальный извлекатель признаков, а выходной классификатор дообучается под 25 семейств.

Оценка качества опирается на метрики, устойчивые к дисбалансу классов: усредненная по классам F-мера отражает равновесное качество по всем семействам, а сбалансированная точность компенсирует различия в частотах классов. При обучении моделей потери взвешиваются обратной частотой классов в обучающей части разбиения, что снижает смещение в сторону доминирующих семейств. Для нейросетевых моделей применяется ранняя остановка по качеству на валидационной части каждого разбиения, чтобы уменьшить риск переобучения при сравнительно малочисленных классах.

Результаты и обсуждение. Классический базовый метод на признаках градиента и текстуры показал высокое качество распознавания семейств при оценке по пяти фрагментам перекрестной проверки, причем усредненная по классам F-мера устойчиво держалась около 0,95 (таблица 2). Подобный результат согласуется с визуальной природой набора: многие семейства имеют характерные текстурные «отпечатки», хорошо фиксируемые дескрипторами структуры. Разброс между фрагментами оказался небольшим, что указывает на стабильность подхода при корректном разбиении без утечек по дубликатам.

Таблица 2

Результаты классического базового метода по перекрестной проверке

Фрагмент	Точность	Сбалансированная точность	Усредненная по классам F-мера
0	0,9795	0,9510	0,9518
1	0,9837	0,9576	0,9541
2	0,9815	0,9514	0,9489
3	0,9864	0,9586	0,9589
4	0,9826	0,9616	0,9638
Среднее ± разброс	0,9827 ± 0,0026	0,9560 ± 0,0047	0,9555 ± 0,0059

Сверточные нейронные сети переноса обучения превзошли классический базовый уровень и обеспечили усредненную по классам F-меру порядка 0,97 на тех же разбиениях, при этом обе архитектуры дали близкие значения, а различия по фрагментам объяснялись главным образом качеством распознавания редких семейств (таблица 3). Высокие значения сбалансированной точности в сочетании с высоким уровнем точности показывают, что модели не ограничились запоминанием частотных классов и сохранили приемлемое качество на малочисленных группах. Отдельные фрагменты демонстрировали более низкий результат, что типично для дисбалансных наборов и подчеркивает необходимость сводить качество по нескольким независимым разбиениям.

Таблица 3

Результаты базовых нейронных сетей по перекрестной проверке

Фрагмент	Сеть	Лучшая эпоха	Лучшая усредненная F-мера
0	ResNet-18	4	0,973392
1	ResNet-18	3	0,952103
2	ResNet-18	7	0,985844
3	ResNet-18	7	0,982538
4	ResNet-18	5	0,987284
Среднее ± разброс	ResNet-18	–	0,9762 ± 0,0145
Фрагмент	EfficientNet-B0	Лучшая эпоха	Лучшая усредненная F-мера
0	EfficientNet-B0	4	0,973392
1	EfficientNet-B0	3	0,952103
2	EfficientNet-B0	7	0,985844
3	EfficientNet-B0	7	0,982538
4	EfficientNet-B0	5	0,987284
Среднее ± разброс	EfficientNet-B0	–	0,9762 ± 0,0145

Многоканальная модель с тремя визуальными представлениями продемонстрировала воспроизводимое качество на всех пяти фрагментах без «провалов», однако уступила нейросетевым базовым моделям по усредненной по классам F-мере (таблица 4). Стабильность по фрагментам стала важным техническим результатом: переход к устойчивой нормализации и экономной схеме обучения позволил избежать деградации при ограниченной памяти вычислительной среды и при наличии разных распределений входных представлений. Отставание по точности указывает на то, что простого расширения входа несколькими картами недостаточно без более сложного механизма согласования признаков и отбора информативных элементов.

Таблица 4

Результаты многоканальной модели с тремя визуальными представлениями по перекрестной проверке

Фрагмент	Лучшая эпоха	Лучшая усредненная по классам F-мера
0	5	0,847852
1	5	0,858119
2	5	0,866019
3	5	0,869299
4	5	0,870196
Среднее ± разброс	–	0,8623 ± 0,0094

Ключевую практическую часть составила проверка устойчивости к параметризованным искажениям, имитирующим изменение визуального образа при сохранении общей структуры данных. Для шумовых искажений и локальной перестановки блоков рассчитывалась не только абсолютная усредненная по классам F-мера, но и относительное сохранение качества, позволяющее сравнивать деградацию моделей на разных уровнях воздействия (таблица 5). При обоих типах искажений наблюдалось ухудшение качества по мере усиления воздействия, причем простое усреднение решений по нескольким представлениям приводило к большему снижению относительного качества по сравнению с использованием базовой карты.

Таблица 5

Относительное сохранение качества классификации при моделируемых искажениях

Вид искажения	Метод	Мера F, усредненная по классам, при максимальном уровне воздействия	Относительное сохранение качества при максимальном уровне воздействия	Среднее относительное сохранение качества по всем уровням воздействия
Внесение шумовых искажений	Классификация по базовой карте	0,454737	0,468918	0,585879
Внесение шумовых искажений	Среднее объединение трех представлений	0,288456	0,327779	0,434010
Локальная перестановка блоков	Классификация по базовой карте	0,815326	0,840752	0,945734
Локальная перестановка блоков	Среднее объединение трех представлений	0,630170	0,716075	0,891472

График устойчивости к шумовым искажениям показывает монотонное падение относительного сохранения качества при увеличении доли искаженных пикселей, а различие между двумя схемами классификации сохраняется на всех рассмотренных уровнях (рисунок 4). Падение для базовой карты оказалось более мягким, что можно объяснить тем, что шум в первую

очередь разрушает производные представления, усиливая высокочастотные компоненты и искажая локальную статистику в карте энтропии. Механическое усреднение решений по нескольким картам в таких условиях переносит в итоговый ответ дополнительную неопределенность.

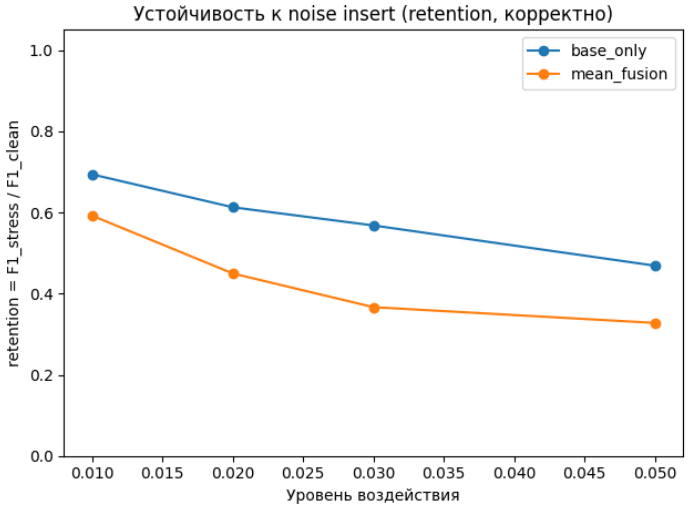


Рис. 4. Устойчивость классификации к внесению шумовых искажений

Похожая картина проявилась при локальной перестановке блоков, где усиление доли переставляемых элементов приводит к снижению качества и уменьшению относительного сохранения метрики у обоих методов (рисунок 5). Отсутствие выигрыша от усреднения по нескольким представлениям указывает на важный отрицательный результат: дополнительные карты не обеспечивают «страховки» от искажений сами по себе, если модель не умеет адаптивно выбирать надежное представление и подавлять ошибочные признаки. Параметрические оценки различий подтверждают, что среднее относительное сохранение качества у схемы усреднения ниже, чем у классификации по базовой карте, а доверительные интервалы разности не пересекают ноль (таблица 6).

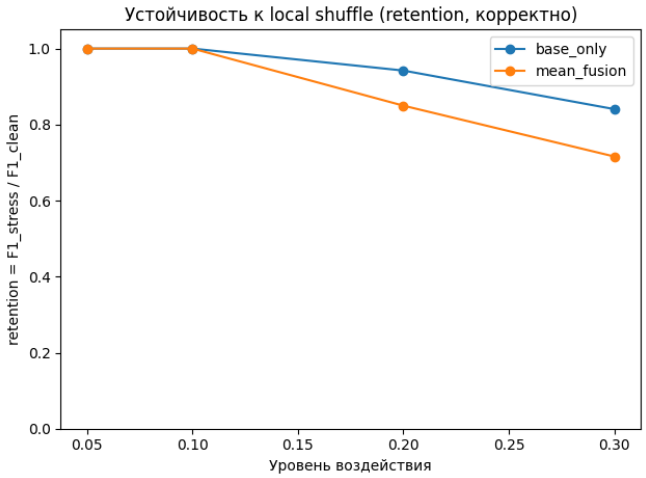


Рис. 5. Устойчивость классификации к локальной перестановке блоков

Таблица 6

Статистическая проверка различий устойчивости методов

Тип	Сравнение	Среднее сохранение качества (mean_fusion)	Среднее сохранение качества (base_only)	Статистика критерия	Уровень значимости	Средняя разность (mean_fusion − base_only)	Доверительный интервал 95%
Внесение шумовых искажений	mean_fusion лучше base_only	0,434010	0,585879	0,0	1.000000	–0,151869	[–0,1676, –0,1358]
Локальная перестановка блоков	mean_fusion лучше base_only	0,891472	0,945734	0,0	0,999965	–0,054262	[–0,0775, –0,0316]

Интерпретация полученных результатов опирается на различие между задачей максимизации качества на «чистых» данных и задачей сохранения работоспособности при контролируемых нарушениях входа. Высокие показатели базовых сетей на исходных изображениях показывают, что визуальное представление двоичных данных действительно эффективно для распознавания семейств в пределах выбранного набора. Одновременно отрицательный эффект простого объединения представлений указывает на необходимость дальнейшего развития подхода в сторону адаптивных механизмов согласования, регуляризации и специализированных критериев обучения, ориентированных на устойчивость, а не только на точность распознавания.

Список литературы

1. Bensaoud A., Kalita J., Bensaoud M. A survey of malware detection using deep learning // Machine Learning with Applications. 2024. Vol. 16. 100546. DOI: 10,1016/j.mlwa.2024.100546.
2. Tayyab U. E. H., Khan F. B., Durad M. H., Khan A., Lee Y. S. A Survey of the Recent Trends in Deep Learning Based Malware Detection // Journal of Cybersecurity and Privacy. 2022. Vol. 2, № 4. P. 800–829. DOI: 10,3390/jcp2040041.
3. Xiao M., Guo C., Shen G., Cui Y., Jiang C. Image-based malware classification using section distribution information // Computers & Security. 2021. Vol. 110, 102420, DOI: 10,1016/j.cose.2021.102420,
4. Awan M. J., Masood O. A., Mohammed M. A., Yasin A., Zain A. M., Damaševičius R. Image-Based Malware Classification Using VGG19 Network and Spatial Convolutional Attention // Electronics. 2021. Vol. 10, № 19. 2444. DOI: 10,3390/electronics10192444.
5. Tran K., Di Troia F., Stamp M. Robustness of Image-Based Malware Analysis // Silicon Valley Cybersecurity Conference (SVCC 2022). Communications in Computer and Information Science. 2023. Vol. 1683. P. 3–21. DOI: 10,1007/978-3-031-24049-2_1.
6. Malimg (Original): набор данных. Текст: электронный // Kaggle: [сайт]. URL: https://www.kaggle.com/datasets/ikrambenabd/malimg-original (дата обращения: 03.03.2026).
7. Kumar S., Janet B. DTMIC: Deep transfer learning for malware image classification // Journal of Information Security and Applications. 2022. Vol. 64. Article 103063. DOI: 10,1016/j.jisa.2021.103063.
8. Kaggle CLI Documentation. Текст: электронный // GitHub: [сайт]. URL: https://github.com/Kaggle/kaggle-cli/blob/main/docs/README.md (дата обращения: 03.03.2026).

9. StratifiedGroupKFold. Текст: электронный // scikit-learn: документация: [сайт]. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.StratifiedGroupKFold.html (дата обращения: 03.03.2026).

10. Adimoolam Y.K., Chatterjee B., Poullis C., Averkiou M. Efficient Deduplication and Leakage Detection in Large Scale Image Datasets with a focus on the CrowdAI Mapping Challenge Dataset. Текст: электронный // arXiv. 2023. arXiv:2304.02296. URL: https://arxiv.org/pdf/2304.02296 (дата обращения: 03.03.2026).

11. Mu Y., Jin M., Song X., Aletras N. Enhancing Data Quality through Simple De-duplication: Navigating Responsible Computational Social Science Research // Proceedings of the 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2024. P. 12477–12492. Текст: электронный. URL: https://aclanthology.org/2024.emnlp-main.694.pdf (дата обращения: 03.03.2026).

12. Mohammed T.M., Nataraj L., Chikkagoudar S., Chandrasekaran S., Manjunath B.S. Malware Detection Using Frequency Domain-Based Image Visualization and Deep Learning. Текст: электронный // arXiv.org. 2021. arXiv:2101.10578. DOI: 10,48550/arXiv.2101.10578. URL: https://arxiv.org/abs/2101.10578 (дата обращения: 03.03.2026).

13. Chong X., Gao Y., Zhang R., Liu J., Huang X., Zhao J. Classification of Malware Families Based on Efficient-Net and 1D-CNN Fusion // Electronics. 2022. Vol. 11, № 19. Art. 3064. DOI: 10,3390/electronics11193064.

14. Nie W. Malware Classification Based on Image Segmentation. Текст: электронный // arXiv.org. 2024. arXiv:2406.03831. DOI: 10,48550/arXiv.2406.03831. URL: https://arxiv.org/abs/2406.03831 (дата обращения: 03.03.2026).

Елисеева Н.В.
к.т.н., доцент кафедры УИТС
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
n.eliseeva@stankin.ru
Морозова Л.С.
студент
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
morozovalisana@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОДУКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЛЕКАРСТВЕННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Аннотация. Задача обеспечения безопасности при лекарственной терапии в условиях полипрагмазии является одним из приоритетных в теме здравоохранения. В статье рассматривается использование продукционной модели для анализа совместимости препаратов, с учетом заболеваний и различных клинических ситуаций. Актуальность исследования связана с активным ростом полипрагмазии. Особенно эта проблема касается пожилых и людей с хроническими заболеваниями, которые вынуждены принимать большое количество препаратов ежедневно. Существующие сервисы проверки совместимости лекарств не всегда учитывают индивидуальные особенности человека: хронические заболевания или подготовка к операции. В результате у пользователя нет полной картины его ситуации, и прием какого-либо препарата может привести к серьезным осложнениям.

Ключевые слова: лекарственные взаимодействия, продукционная модель, полипрагмазия, безопасность лекарственной терапии, клинические ситуации, заболевания

liseeva N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of MITS
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
n.eliseeva@stankin.ru
Morozova L.S.
Student
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
morozovalisana @gmail.com

APPLICATION OF A PRODUCTION MODEL FOR ANALYZING DRUG INTERACTIONS FOR PERSONAL USE

Abstact. The task of ensuring safety during drug therapy in the context of polypharmacy is one of the priorities in the field of healthcare. The article discusses the use of a production model for analyzing the compatibility of drugs, taking into account diseases and various clinical situations. The relevance of this research is related to the growing prevalence of polypharmacy. This issue is particularly relevant for older individuals and those with chronic conditions, who often require multiple medications on a daily basis. However, existing services for checking drug compatibility do not always take into account individual factors such as chronic diseases or preparation for surgery. As a result, the user does not have a complete picture of their situation, and taking any medication can lead to serious complications.

Keywords: drug interactions, production model, polypharmacy, drug therapy safety, clinical situations, diseases

Проблема безопасности лекарственной терапии вышла за пределы клинической практики на уровень повседневного использования препаратов [1]. Люди с хроническими заболеваниями, и без них, все чаще принимают множество лекарств одновременно. Часть препаратов назначают врачи, не учитывая уже раннее принимаемые лекарства. Другую часть люди самостоятельно приобретают в аптеках. Самолечение становится нормой, доступность безрецептурных лекарств растет, а информации в интернете слишком много. В итоге перед человеком встает вопрос: «А можно ли вообще все это принимать вместе?»

Данный случай называется полипрагмазией. Чем больше препаратов, тем выше риск осложнений и неэффективности лечениях [1]. Особенно эта проблема встречается у пациентов с несколькими заболеваниями. Их лечат по разным схемам, но мало кто объединяет их воедино. Проблема связана не только с количеством препаратов, но и с разными типами взаимодействий. В данной статье рассматриваются 3 вида: препарат-препарат, препарат-заболевание, препарат-клиническая ситуация. Последнее включает подготовку к операции, беременность или сдачу анализа в ближайшие дни.

Из этого следует, что препарат, безопасный для одного человека, может быть опасным для другого. Так нестероидные противовоспалительные сред-

ства при язве желудка, и прием антикоагулянтов перед операцией, увеличивают риск кровотечения. Подобные ограничения широко представлены в медицине.

Существующие сервисы в основном проверяют только пару «препарат-препарат», и не учитывают другие факторы [4]. Некоторые системы анализируют глубже, но логика алгоритма непрозрачна. Человек должен понимать цепочку рассуждений, видеть какое именно ограничение сработало и почему комбинация признана опасной.

В медицинских системах поддержки принятия решения используются различные подходы: логические модели, графы, нейронные сети, продукционные системы [2, 3]. В данной работе исследуется применение продукционного подхода, представленного в виде правил «если-то». Основное внимание уделяется структуре правил и способу формализации медицинских знаний.

В литературе описаны различные способы представления медицинских знаний для автоматизированных систем. К ним относятся логическая модель, графовые структуры и методы машинного обучения, включая нейронные сети. У каждого из этих методов есть свои сильные стороны. Логические модели обеспечивают строгий вывод. Графы удобны для хранения связанных данных. Нейронные сети эффективны при обработке больших объемов информации [3, 5].

Однако для решения задачи персонализированного анализа взаимодействия лекарств возникают два ключевых требования: объяснимость результата и удобство обслуживания базы знаний. Пользователь должен понимать, почему система считает ту или иную комбинацию лекарств опасной. А из-за регулярного обновления инструкций к лекарствам, система должна позволять добавлять новые ограничения без переустройства всей системы.

Каждый из вышеперечисленных методов имеет ограничения и не удовлетворяет обоим требованиям одновременно.

Поэтому для реализации механизма лекарственных взаимодействий в работе использована продукционная модель представления знаний [6]. Выбор обусловлен тем, что данный подход позволяет описать медицинские знания в виде правил, которые просто читать, проверять и обновлять без изменения всей системы. Для медицинских сервисов, прозрачность логики критически важна.

В основе модели лежит набор правил «если-то». Поэтому каждое ограничение можно записать как отдельное условие, которое проверяется автоматически после ввода пользовательских данных. При проектировании структуры акцент делался не только на взаимодействии лекарственных средств, но и на общую клиническую картину пользователя. В рамках разработки были выделены три основные группы взаимодействий:

Препарат – Препарат.

Препарат – Заболевание.

Препарат – Клиническая ситуация.

База знаний основана на инструкции к медицинским препаратам, структура которых регламентируется Решение Совета ЕЭК №88 и Федеральный закон «Об обращении лекарственных средств» от 12.04.2010 N 61-ФЗ [7]. Нужная информация содержится в разделах: показания к применению, противопоказания, особые указания и меры предосторожности при применении, фертильность, беременность и лактация, взаимодействие с другими лекарственными препаратами и другие виды взаимодействия.

После извлечения информации и определения категории взаимодействия формируется логическая структура правила, которая делится на 2 части (см. рис. 1).



Рис. 1. Структура продукционного правила

Первая отвечает за проверку условий и описывает комбинацию факторов, при которой взаимодействие считается опасным. Вторая часть – результат обработки, включающий в себя уровень риска и текст рекомендации. Большинство взаимодействий зависит от нескольких факторов сразу, поэтому логика проверки строится на вложенных условиях.

Использование вложенных конструкций позволяет описывать более сложные клинические сценарии. Система может учитывать наличие конкретного препарата, заболевания и дополнительного фактора одновременно.

Для автоматической обработки все медицинские данные приводились к унифицированному виду. В качестве идентификатора препарата используется международное непатентованное наименовние (МНН), что позволяет исключить дублирование правил, связанное с различными торговыми названиями одного и того же действующего вещества. Для заболеваний и клинических ситуаций были использованы символьные идентификаторы. Нормализация сущность снижает зависимость работы системы от формы записи и обеспечивает единообразную обработку данных.

После формирования логической структуры выбираются проверяемые факты, разделенные на 3 типа:

1. Наличие препарата.
2. Наличие болезни.
3. Наличие дополнительного фактора.

После запуска, введенные пользователем данные преобразуются в набор фактов. Система последовательно проверяют условие каждого активного правила. Если условия выполняются, система выдает предупреждение, и оно добавляется к итоговому результату.

Для каждого ограничения устанавливается уровень риска, позволяющий отделить незначительное взаимодействие от опасных. В проекте используется 4 категории риска: низкий, средний, высокий, противопоказано.

Завершающим этапом является вывод сформированного предупреждения, которое содержит пояснение причины ограничения и возможные действия для пользователя.

Разработана продукционная модель анализа лекарственных взаимодействий. Модель ориентирована на персональное использование. Основная задача – создание структуры правил, учитывающей совместимость препаратов и индивидуальные особенности пациента (заболевания, клинические ситуации).

Сформирована база правил, где источником являются официальные инструкции к лекарственным препаратам. Это обеспечило клиническую достоверность базы знаний.

Построена единая схема представления медицинских ограничений. Каждое правило включает три компонента: набор условий, уровень риска, рекомендацию. Единый механизм анализа применяется ко всем категориям ограничений.

Проверка модели выполнена на тестовых сценариях. Сценарии содержали комбинации препаратов, заболеваний и дополнительных факторов риска. Система корректно определяла взаимодействия. Предупреждения формировались в соответствии с заданным уровнем риска.

Проверена комбинация варфарина и нестероидных противовоспалительных препаратов. После ввода данных система определила высокий риск кровотечения. Аналогично протестированы ограничения при заболеваниях желудочно-кишечного тракта, беременности и подготовке к диагностическим процедурам (см. рис. 2).

Подтверждена возможность расширения базы знаний без изменения архитектуры системы. Новое взаимодействие добавляется через отдельное JSON-правило. Правило подключается к общей базе. Такой подход упрощает поддержку системы и позволяет постепенно обновлять медицинские ограничения.

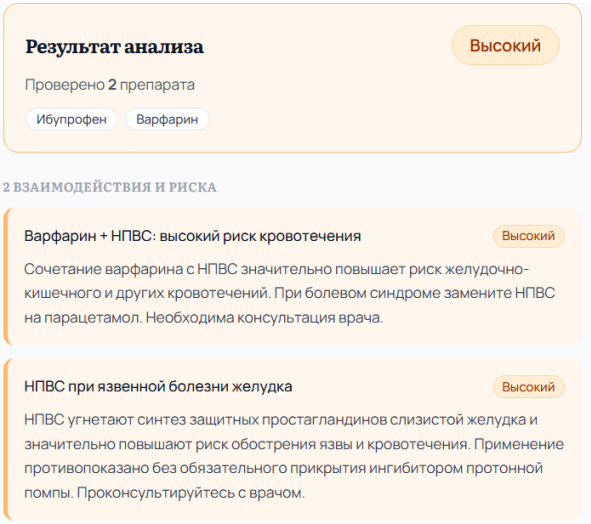


Рис. 2. Пример результат анализа

Продукционная модель признана пригодной для персональных систем анализа лекарственных взаимодействий [6, 8]. Правила «если–то» формализуют медицинские знания, учитывают клинические факторы и обеспечивают прозрачность логики принятия решений.

Список литературы

1. Сычев Д. А., Отделенов В. А., Краснова Н. М., Ильина Е. С. Полипрагмазия: взгляд клинического фармаколога // Терапевтический архив. 2016. Т. 88, № 12. С. 94–102.
2. Перспективы искусственного интеллекта в доклинических и клинических исследованиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://pharmnewskz.com/ru/article/perspektivy-iskusstvennogo-intellekta-v-doklinicheskih-i-klinicheskih-issledovaniyah_25069 (дата обращения: 30,04.2026).
3. Machine learning based drug drug interaction prediction: a critical review of models, limitations, and data challenges // Frontiers in Pharmacology. 2025. Vol. 16, Article 1632775.
4. Паникарский В. В. Подходы к анализу лекарственных взаимодействий // Вестник новых медицинских технологий. 2023. URL: https://vestniknmt.ru/jour/article/view/156
5. Графовые нейронные сети для моделирования сложных взаимодействий // ГРФЦ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rdc.grfc.ru/2023/09/graph_neural_nets/ (дата обращения: 30,04.2026).
6. Сычёв Д. А. Продукционно-правиловые системы в клинической фармакологии // Клиническая фармакология и терапия. 2022. URL: https://www.mediasphera.ru/issues/klin-farma-ter/2022/3/10,17816/2311-388320223210-218
7. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 03.11.2016 № 88 «Об утверждении требований к инструкции по медицинскому применению лекарственного препарата и общей характеристике лекарственного препарата для медицинского применения» (ред. от 21.02.2025). Доступ из справ.-правовой системы «Контур.Норматив».
8. Карандеев А. А., Яшин Н. А., Сивакова Т. В., Видякин А. В. Разработка модели для оценки взаимодействия между медицинскими препаратами // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2023. № 57. 12 с.

Злыдникова Е.Р.
студент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Росссия, Санкт-Петербург
zlydnikoaekaterina@gmail.com

ПРОВЕДЕНИЕ ABC-XYZ-АНАЛИЗА И КЛАСТЕРИЗАЦИИ КЛИЕНТСКОЙ БАЗЫ

Аннотация. Рассмотрена задача сегментации товарного ассортимента и клиентской базы розничного предприятия с использованием методов ABC-XYZ-анализа и кластеризации в среде low-code платформы Loginom. Выполнена реализация автоматизированного сценария обработки транзакционных данных, включающего загрузку и объединение справочной информации, расчет маржинальной прибыли и коэффициента вариации, а также проведение ABC- и XYZ-классификации с применением компонентов библиотеки Loginom Silver Kit. Успешно проведена кластеризация клиентской базы на основе RFM-признаков методом k-means с определением оптимального числа кластеров по методу локтя. В результате получены матрицы ABC-XYZ для товаров и покупателей, определены девять классов, для которых разработаны индивидуальные стратегии управления запасами и взаимодействия с клиентами в рамках CRM-аналитики. Выделены четыре сегмента клиентов численностью 22, 396, 374 и 44 человека, выполнено сопоставление результатов кластеризации и ABC-XYZ-анализа. Представлены примеры расчета классификаций и результаты визуализации аналитических матриц. Применение предложенного подхода позволяет автоматизировать процессы сегментации, повысить обоснованность управленческих решений, оптимизировать товарные запасы, снизить издержки на хранение и адаптировать торговую политику под особенности различных групп покупателей.

Ключевые слова: ABC-XYZ анализ, кластеризация, управление запасами, CRM-аналитика, Loginom, Loginom Silver Kit, сегментация клиентов, RFM-признаки, k-means.

Zlydnikova E.R.
Student
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Russia, Saint-Petersburg
zlydnikoaekaterina@gmail.com

ONDUCTING ABC-XYZ ANALYSIS AND CLUSTERING OF THE CLIENT BASE

Abstact. The problem of segmentation of the product assortment and customer base of a retail enterprise using ABC-XYZ analysis and clustering methods in the low-code environment of the Loginom platform is considered. An automated data processing scenario was implemented, including loading and merging reference information, calculating marginal profit and coefficient of variation, as well as performing ABC and XYZ classification using components of the Loginom Silver Kit library. Clustering of the customer base was successfully carried out based on RFM features using the k-means method with determination of the optimal number of clusters by the elbow method. As a result, ABC-XYZ matrices for products and customers were obtained, nine classes were identified, for which individual inventory management and customer interaction strategies were developed within the framework of CRM analytics. Four customer segments were identified with sizes of 22, 396, 374 and 44 people,

and a comparison of the clustering results with the ABC-XYZ analysis was performed. Examples of classification calculations and visualization results of analytical matrices are presented. The application of the proposed approach allows automating segmentation processes, increasing the validity of management decisions, optimizing inventory, reducing storage costs, and adapting trade policy to the characteristics of different customer groups.

Keywords: ABC-XYZ analysis, clustering, inventory management, CRM analytics, Loginom, Loginom Silver Kit, customer segmentation, RFM attributes, k-means.

Современные компании накапливают огромные массивы данных о транзакциях. Однако простое хранение информации не приносит пользы без ее качественной обработки и интерпретации. Для превращения «сырых» данных в стратегически значимые решения используются методы аналитической сегментации.

Эффективность логистики и управления взаимоотношениями с клиентами напрямую зависит от точности настройки ассортиментной политики и сервиса. Универсальные подходы к управлению запасами зачастую приводят либо к дефициту популярных товаров, либо к затовариванию склада низколиквидными позициями. Аналогичная ситуация наблюдается в маркетинге: одинаковые условия для всех клиентов снижают лояльность ключевых партнеров и не стимулируют отстающих. Решением является внедрение дифференцированных стратегий, базирующихся на объективных данных.

Наиболее популярным инструментом для такой дифференциации является связка методов ABC и XYZ. ABC-анализ позволяет оценить вклад каждой товарной позиции или клиента в общий финансовый результат, разделяя объекты на группы по степени важности (A – наиболее ценные, B – средние, C – наименее ценные). XYZ-анализ классифицирует объекты по стабильности потребления или продаж (X – стабильный спрос, Y – сезонные колебания, Z – нерегулярный спрос). Совмещение этих двух методов в матрицу 3×3 дает девять классов, для каждого из которых могут быть разработаны индивидуальные стратегии управления.

Однако классический ABC-XYZ подход имеет ограничения. Во-первых, он оперирует двумя измерениями (финансовая ценность и стабильность), что не всегда позволяет уловить сложные поведенческие паттерны клиентов. Во-вторых, границы групп являются условными. В-третьих, классический подход дает обобщенные рекомендации, но не позволяет выделить подгруппы внутри одного класса.

Дополнительным инструментом углубленной сегментации выступает кластерный анализ. В отличие от ABC-XYZ, кластеризация не требует априорного задания границ групп и способна выявить скрытые структуры в многомерном пространстве признаков. Сочетание двух методов дает синергетический эффект.

Цель данной работы – сегментировать клиентскую базу розничного предприятия с использованием двух методов: ABC-XYZ анализа и кластеризации.

Подготовка исходных данных

Для анализа использовались данные розничного предприятия за 2023–2025 гг.: справочник клиентов (836 записей после очистки), справочник продуктов (312), справочник магазинов (15), таблица транзакций (48 672). Выполнены удаление дубликатов и обработка пропусков.

Инструментарий

Разработка выполнена в low-code платформе Loginom с использованием библиотеки Loginom Silver Kit (узлы «ABC-анализ» и «XYZ-анализ»). Кластеризация выполнена методом k-means.

Реализация процесса ABC-XYZ анализа в Loginom

Разработанный сценарий (рис. 1) автоматизирует процесс расчета и визуализации.

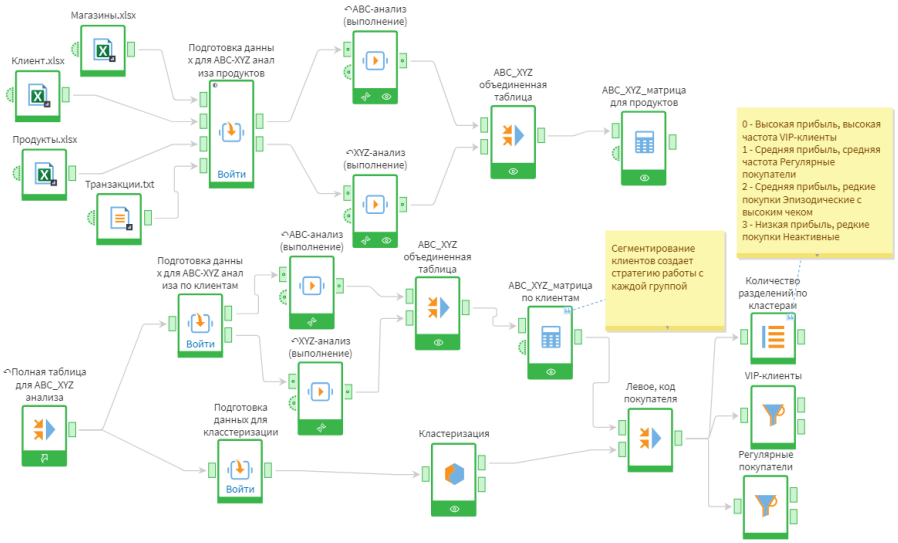


Рис. 1. Схема процесса ABC-XYZ анализа и кластеризации в Loginom

Данные из узлов-источников поступают в узел объединения «Полная таблица для ABC_XYZ анализа». С помощью узла «Расчёт прибыли по продуктам» рассчитывается маржинальная прибыль. Подготовленный массив подается на узлы «ABC-анализ» и «XYZ-анализ» из библиотеки Loginom Silver Kit [2].

Проводятся три аналитические ветки:

- По продуктам (рис. 2): группировка по продуктам, расчет прибыли и коэффициента вариации, ABC-XYZ классификация.
- По клиентам: группировка по клиентам, аналогичный расчет метрик, ABC-XYZ классификация.
- По клиентам (кластеризация) (рис .3): подготовка многомерного признакового пространства (RFM+признаки) и проведение кластерного анализа методом k-means.

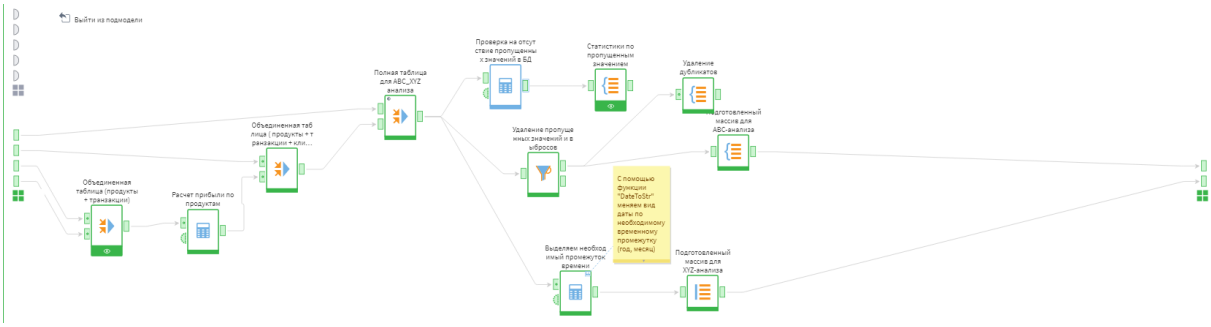


Рис. 2. Схема подмодели «Подготовка данных для ABC-XYZ анализа продуктов»

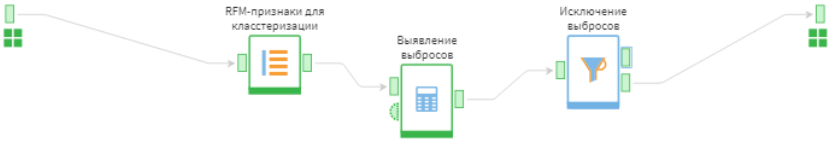


Рис. 3. Подготовка данных для кластеризации

Такое построение позволяет в дальнейшем сопоставить результаты двух независимых подходов к сегментации одной клиентской базы и выявить зоны их согласия/рассогласования.

Расчет метрик

В узле «Калькулятор» рассчитывается маржинальная прибыль:

$$(TSena - zakupochnaya_tsena) * kolichestvo \quad (1)$$

Для XYZ-анализа данные группируются по годам (2023–2025). Из поля «Дата» извлекается год. Узел «Кросс-таблица» группирует данные по продуктам и годам с суммированием прибыли. Коэффициент вариации (CV) рассчитывается как отношение стандартного отклонения к среднему значению.

Проведение ABC и XYZ анализов

Узлы «ABC-анализ» (рис. 4) и «XYZ-анализ» (рис. 5) из библиотеки Loginom Silver Kit реализуют алгоритмы классификации.

5	P001	5254,65	76,70832946	A
6	P036	5005,95	86,45740036	B
7	P050	4043,55	94,33220047	B
8	P006	1568,52	97,38688793	C
9	P009	642,45	98,63805716	C

Рис. 4. Итоговая таблица ABC-анализа

4	P013	Z	66,66666667	362180,7
5	P014	Z	84,85281374	301817,25
6	P002	Y	20,20305089	422544,15
7	P010	Y	20,20305089	422544,15
8	P030	Y	25	482907,6
9	P045	X	0	241453,8

Рис. 5. Итоговая таблица XYZ-анализа

Пороговые значения ABC: A – 80%, B – 95%, C – 100%. XYZ: X (CV < 10%), Y (10% ≤ CV ≤ 25%), Z (CV > 25%).

Кластеризация клиентской базы

С ABC-XYZ анализом по клиентам проводится кластеризация. В отличие от ABC-XYZ, где группы задаются априорными границами, кластеризация позволяет выделить естественные группы клиентов на основе их поведенческого сходства.

Для каждого клиента рассчитаны RFM-признаки: суммарная прибыль, частота покупок, средний чек, количество магазинов, количество категорий. Выбросы исключены. Перед проведением кластеризации признаки были стандартизированы. Оптимальное число кластеров (k=4) определено методом локтя по точке перегиба кривой WCSS. Выполнена кластеризация методом k-means.

Формируются три итоговые аналитические матрицы: по продуктам (рис. 6), по клиентам (ABC-XYZ) (рис. 7) и матрица сопоставления кластеризации и ABC-XYZ анализа по клиентам (рис. 8).

Объект | Объект | +

Группа | + | ∑ Факты

Группа	A	B	C	Итого:
X	70	28	70	168
Y	15	6	15	36
Z	25	10	25	60
Итого:	110	44	110	264

Рис. 6. Распределение количества продуктов по классам ABC-XYZ

Анализ 264 продуктов: группа A – 110 (41,7%), B – 44 (16,7%), C – 110 (41,7%); группа X – 168

	A	B	C	Итого:
X	252	154	126	532
Y	54	33	27	114
Z	90	55	45	190
Итого:	396	242	198	836

Рис. 7. Распределение количества клиентов по классам ABC-XYZ

Анализ 836 клиентов: группа A – 396 (47,4%), B – 242 (28,9%), C – 198 (23,7%); группа X – 532 (63,6%), Y – 114 (13,6%), Z – 190 (22,7%). Класс AX – 252 клиента (30,1%).

Объединение результатов кластеризации и ABC-XYZ анализа

На заключительном этапе выполняется объединение результатов кластеризации с матрицей ABC-XYZ по клиентам. Этот шаг является ключевым элементом предлагаемой методики – он позволяет наложить поведенческие сегменты, полученные методом k-means, на классическую матрицу 3×3 и выявить неоднородность внутри ячеек ABC-XYZ. Выходной набор данных после объединения представлен на рисунке 8.

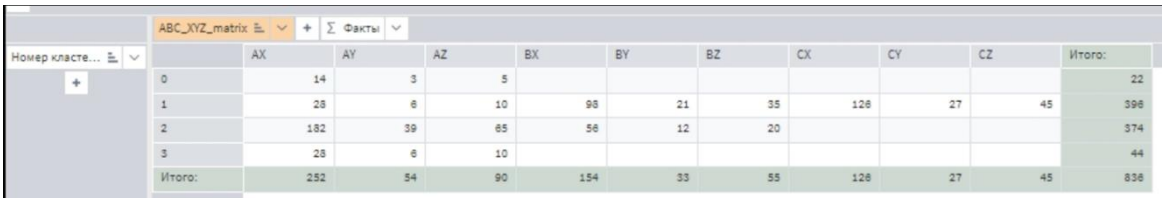


Рис. 8. Результат соединения кластеризации с ABC-XYZ матрицей по клиентам

Результаты интегрированного анализа позволили выделить четыре сегмента клиентов.

Стратегии управления запасами

На основе матрицы ABC-XYZ разработаны дифференцированные стратегии управления товарными запасами.

Для высокоприбыльных товаров: AX (стабильные) – максимальный страховой запас, исключение дефицита; AY (средняя стабильность) – прогнозирование с учетом сезонности, резерв под пики; AZ (нестабильные) – работа под заказ, минимальный складской запас, высокая оперативность поставок.

Для среднеприбыльных товаров: BX (стабильные) – стандартные процедуры заказа фиксированными партиями; BY (средняя стабильность) – смешанная стратегия (склад + заказ); BZ (нестабильные) – анализ целесообразности, возможен перевод под заказ.

Для низкоприбыльных товаров: CX (стабильные) – минимизация затрат на хранение, поиск дешевых поставщиков; CY (средняя стабильность) – заказ мелкими партиями, контроль оборачиваемости; CZ (нестабильные)

– заказ только под конкретного клиента, рекомендуется исключение из ассортимента.

Стратегии взаимодействия с клиентами на основе ABC-XYZ

По результатам ABC-XYZ классификации клиентов предложены следующие стратегии.

Для наиболее ценных клиентов:

- AX (стабильные) – VIP-обслуживание, персональный менеджер, эксклюзивные предложения
- AY (регулярные) – персональные предложения, бонусы за лояльность
- AZ (нерегулярные) – реактивационные кампании, анализ причин нестабильности

Для клиентов средней ценности:

- BX (стабильные) – стандартные программы лояльности, регулярные рассылки
- BY (регулярные) – стимулирование частоты покупок, кросс-продажи
- BZ (нерегулярные) – спецпредложения для повышения активности, мониторинг риска потери

Для низкоценных клиентов:

- CX (стабильные) – стандартное обслуживание, минимизация затрат на привлечение
- CY (регулярные) – автоматизированные рассылки, наблюдение за динамикой
- CZ (нерегулярные) – обслуживание на общих основаниях, без дополнительных инвестиций.

Результаты кластеризации и ABC-XYZ анализа

Полученные в ходе исследования результаты позволяют не только выделить отдельные сегменты, но и сопоставить данные двух независимых методов – ABC-XYZ анализа и кластеризации. Это дает возможность более глубоко интерпретировать поведение клиентов и уточнить рекомендуемые стратегии взаимодействия, что и составляет основную новизну данной работы.

На основе интегрированного анализа, объединяющего результаты кластеризации и ABC-XYZ классификации клиентов (рис. 8), выделены четыре сегмента клиентов, различающиеся по структуре распределения внутри матрицы ABC-XYZ.

Кластер 0 является малочисленным сегментом, в котором преобладают клиенты категорий AX (14 клиентов) и AZ (5 клиентов). Данный сегмент характеризуется высокой ценностью клиентов и преимущественно относится к прибыльным категориям с различной степенью стабильности спроса. Для данного сегмента целесообразны стратегии персонализированного обслуживания и удержания ключевых клиентов.

Кластер 1 является крупнейшим сегментом клиентской базы и включает 396 клиентов. В его структуре доминируют категории CX (126 клиентов), BX (98 клиентов) и CZ (45 клиентов). Это указывает на смешанный

массовый сегмент, объединяющий клиентов средней и низкой ценности, включая значительную долю нестабильных клиентов. Для данного сегмента рекомендуются стандартные программы лояльности, стимулирование активности и меры по повышению частоты покупок.

Кластер 2 включает 374 клиента и представляет собой второй по величине сегмент. В нем преобладают категории AX (182 клиента), AZ (65 клиентов) и BX (56 клиентов), что позволяет характеризовать данный кластер как ключевой прибыльный сегмент клиентской базы. Для этой группы рекомендуются стратегии приоритетного сопровождения, развития долгосрочной лояльности и расширения продаж.

Кластер 3 включает 44 клиента и характеризуется преобладанием категорий AX (28 клиентов) и AZ (10 клиентов). Данный сегмент является малочисленным, но содержит высокоценных клиентов и требует индивидуализированных стратегий взаимодействия.

Сравнение результатов

Сравнение результатов показывает, что кластеризация позволяет выделить поведенческие паттерны, которые не всегда очевидны при использовании только ABC-XYZ подхода. Один кластер может включать клиентов из нескольких классов ABC-XYZ, а отдельные классы ABC-XYZ могут присутствовать в разных кластерах. Это подтверждает наличие внутренней неоднородности внутри классической матрицы ABC-XYZ.

Таким образом, совместное использование кластеризации и ABC-XYZ анализа позволяет более детально настроить стратегии взаимодействия с клиентами, учитывая как их ценность и стабильность, так и поведенческие особенности.

В работе выполнены ABC-XYZ анализ и кластеризация клиентской базы розничного предприятия в среде Loginom. Разработанный сценарий автоматизирует расчет маржинальной прибыли, коэффициента вариации, проведение ABC-XYZ классификации и кластеризацию клиентов на основе RFM-признаков.

В результате исследования получены следующие основные результаты:

- Выполнена сегментация товарного ассортимента и клиентской базы с использованием комбинации ABC-XYZ анализа и кластеризации методом k-means.

- Для клиентской базы выделены четыре кластера численностью 22, 396, 374 и 44 клиента соответственно, различающиеся по структуре распределения внутри матрицы ABC-XYZ.

- Установлено, что отдельные кластеры объединяют клиентов из нескольких классов ABC-XYZ, а одни и те же классы ABC-XYZ могут присутствовать в разных кластерах, что подтверждает внутреннюю неоднородность классической ABC-XYZ сегментации.

- Показано, что совместное применение кластеризации и ABC-XYZ анализа позволяет уточнить стратегии взаимодействия с клиентами за счет

учета не только ценности и стабильности, но и поведенческих особенностей клиентов.

- Разработаны дифференцированные стратегии управления запасами и клиентскими отношениями для различных сегментов товаров и покупателей.

Таким образом, предложенный подход позволяет повысить точность аналитической сегментации и может быть использован розничными предприятиями для поддержки решений в области управления запасами и CRM-аналитики.

Список литературы

1. Pandya, B. A Review on Inventory Management Control Techniques: ABC-XYZ Analysis / B. Pandya, H. Thakkar // REST Journal on Emerging Trends in Modelling and Manufacturing. – 2016. – Vol. 2, № 3. – P. 82–86. URL: https://restpublisher.com/wp-content/uploads/2016/09/A-Review-on-Inventory-Management-Control-Techniques-ABC-XYZ-Analysis.pdf (дата обращения: 26.03.2026).
2. Loginom Community. Примеры: ABC-XYZ-анализ [Электронный ресурс]. – URL: https://examples.loginom.ru/abc-xyz-analysis / (дата обращения: 27.02.2026).
3. Scholz-Reiter, B. Integration of demand forecasts in ABC-XYZ analysis: practical investigation at an industrial company / B. Scholz-Reiter, J. Heger, C. Meinecke, J. Bergmann // International Journal of Productivity and Performance Management. – 2012. – Vol. 61, № 4. – P. 445–451. URL: https://www.researchgate.net/publication/260634553_Integration_of_demand_forecasts_in_ABC-XYZ_analysis_Practical_investigation_at_an_industrial_company (дата обращения: 26.03.2026).
4. Fader, P. S. Customer Centricity: Focus on the Right Customers for Strategic Advantage / P. S. Fader // Wharton Executive Essentials. – 2020, – 2nd ed. – 128 p. URL: https://www.amazon.com/Customer-Centricity-Second-Strategic-Wharton-Executive/dp/1613631399 (дата обращения: 28.03.2026).
5. Zhang, Y. An improved RFM model based on clustering and weighted association rules for customer segmentation / Y. Zhang, L. Chen // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2020, – Vol. 39, № 3. – P. 3951–3961. DOI: 10,3233/JIFS-200112. URL: https://content.iospress.com/articles/journal-of-intelligent-and-fuzzy-systems/ifs200112 (дата обращения: 28.03.2026).
6. Jain, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means / A. K. Jain // Pattern Recognition Letters. – 2010, – Vol. 31, № 8. – P. 651–666. DOI: 10,1016/j.patrec.2009.09.011. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016786550900232X (дата обращения: 27.03.2026).

Исрайилова А.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
arizu.i@mail.ru
Скопинцев И.В.
к.т.н., профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
i.v.skopintsev@mospolytech.ru

РАЗРАБОТКА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРОВ: ПОИСК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ АЛЬТЕРНАТИВ УПАКОВКЕ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. Экологическая проблема, связанная с пластиковой упаковкой, требовала исследовать биоразлагаемые полимеры в качестве того, чтобы найти экологически чистые альтернативы. В этом исследовании исследуются разработка и применение биоразлагаемых полимеров с акцентом на их свойства для усовершенствования упаковки в пищевой промышленности. Биоразлагаемые полимеры, полученные из возобновляемых источников, таких как крахмал, целлюлоза, полилактид (PLA) и полигидроксиалканоаты (PHA), обладают многообещающими свойствами, включая способность к биологическому разложению, снижение выбросов углекислого газа и совместимость со стандартами безопасности пищевых продуктов. В ходе исследования оцениваются характеристики этих материалов с точки зрения механической прочности, барьерных свойств и биоразлагаемости в различных условиях окружающей среды. Достижения в области технологий смешивания, нанокомпозитов и добавок на биологической основе рассматриваются как инновационные подходы к преодолению таких проблем, как стоимость, производство и долговечность материалов. Предоставляя информацию о последних разработках и приложениях, это исследование подчеркивает решающую роль биоразлагаемых полимеров в снижении загрязнения пластиком, поддержке экономики замкнутого цикла и удовлетворении спроса пищевой промышленности на экологически безопасные упаковочные решения.

Ключевые слова: полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA), биоразлагаемые полимеры, полимеры на основе крахмала, производные целлюлозы и окружающая среда.

Israilova A.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
arizu.i@mail.ru
Skopintsev I.V.
Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department
of Processes and Apparatus of Chemical Engineering
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
i.v.skopintsev@mospolytech.ru

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE POLYMERS: THE SEARCH FOR ENVIRONMENTALLY FRIENDLY PACKAGING ALTERNATIVES IN THE FOOD INDUSTRY

Abstact. The environmental problem associated with plastic packaging required the research of biodegradable polymers in order to find environmentally friendly alternatives. This study explores the development and application of biodegradable polymers, with a focus on their properties to improve packaging in the food industry. Biodegradable polymers derived from renewable sources such as starch, cellulose, polylactide (PLA), and polyhydroxyalkanoates (PHA) have promising properties, including biodegradability, reduced carbon dioxide emissions, and compatibility with food safety standards. The study evaluates the characteristics of these materials in terms of mechanical strength, barrier properties, and biodegradability in various environmental conditions. Advances in mixing technologies, nanocomposites, and biologically based additives are seen as innovative approaches to overcoming challenges such as cost, production, and durability of materials. By providing information on the latest developments and applications, this study highlights the crucial role of biodegradable polymers in reducing plastic pollution, supporting a closed-loop economy, and meeting the food industry's demand for environmentally sound packaging solutions.

Keywords: polylactide (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), biodegradable polymers, starch-based polymers, cellulose derivatives and the environment.

Пищевая промышленность в значительной степени полагается на пластиковую упаковку для сохранения качества пищевых продуктов, продления срока годности и обеспечения безопасности при транспортировке. Однако широкое использование пластмасс на нефтяной основе привело к серьезным экологическим проблемам, включая накопление отходов, не поддающихся биологическому разложению, загрязнение микропластиком и выбросы парниковых газов в процессе производства и утилизации. Биоразлагаемые полимеры стали многообещающим решением, предлагающим двойные преимущества экологической совместимости и функциональных характеристик. Полученные из возобновляемых или синтетических источников, эти материалы при соответствующих условиях распадаются на природные вещества, такие как вода, углекислый газ и биомасса. Обычно исследуемые биоразлагаемые полимеры включают полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA), полимеры на основе крахмала и производные целлюлозы. Каждый тип обладает уникальными свойствами, которые могут быть предназначены для определённый упаковок пищевой продукции. Несмотря на свойства, биоразлагаемые полимеры сталкиваются с такими проблемами, как более высокие производственные затраты, ограниченная механическая прочность и непостоянная скорость разложения в естественных условиях. Кроме того, осведомленность потребителей и нормативно-правовая база все еще развиваются, что влияет на темпы их внедрения. Решение этих проблем с помощью технологических инноваций и политической поддержки имеет решающее значение для продвижения биоразлагаемых полимеров в качестве альтернативы традиционным пластмассам в пищевой промышленности. Этот сдвиг важен не только для уменьшения воздействия упаковки на

окружающую среду, но и для удовлетворения растущего потребительского спроса на экологически чистые продукты.

Основная цель данной работы – изучить разработку, свойства и применение биоразлагаемых полимеров в качестве экологически чистых альтернатив обычной пластиковой упаковке в пищевой промышленности.

Целью данной работы является поддержка перехода к экологически устойчивым упаковочным решениям, которые соответствуют мирным стремлениям по борьбе с загрязнением пластика и изменением климата.

Биоразлагаемые полимеры в широком смысле подразделяются на натуральные и синтетические. Природные полимеры, такие как крахмал, целлюлоза, хитозан и белки, получают из возобновляемых источников и обладают присущей им способностью к биологическому разложению. Исследования показали, что полимеры на основе крахмала являются экономически эффективными и широкодоступными, хотя для улучшения механических свойств и водостойкости их часто требуется смешивать. Синтетические биоразлагаемые полимеры, такие как полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA) и поликапролактон (PCL), обладают большей универсальностью и индивидуальными свойствами. PLA, получаемый из кукурузного крахмала или сахарного тростника, был тщательно исследован на предмет его превосходной прозрачности, термостойкости и соответствия требованиям безопасности пищевых продуктов. PHA, получаемый путем микробиологической ферментации, привлекает внимание своей превосходной способностью к биологическому разложению и механическим свойствам, хотя высокая стоимость его производства остается проблемой.

Эксплуатационные характеристики для упаковки пищевых продуктов биоразлагаемые полимеры должны обладать достаточной механической прочностью, барьерными свойствами и термостойкостью, чтобы конкурировать с обычными пластмассами. Исследования показывают, что характеристики этих полимеров могут быть значительно повышены с помощью таких методов, как смешивание, сшивание и введение наполнителей, таких как глина и графен. Например, нанокомпозиты с PLA-матрицами продемонстрировали улучшенные газонепроницаемые свойства и долговечность, что делает их пригодными для упаковки скоропортящихся пищевых продуктов.

Экологические преимущества и проблемы несколько оценок жизненного цикла показали, что биоразлагаемые полимеры оставляют меньший углеродный след по сравнению с пластиками на нефтяной основе. Однако их разложение часто зависит от конкретных условий окружающей среды, таких как температура, влажность и микробиологическая активность, которые не всегда могут присутствовать в естественных условиях. Кроме того, высокая стоимость производства и ограниченные возможности промышленного удобрения создают препятствия для широкого внедрения.

Исследования потребительского представления и нормативно-правовой базы показывают растущий потребительский спрос на экологичную

упаковку, и многие готовы платить больше за экологически чистые упаковки. Однако успех биоразлагаемых полимеров также зависит от четкой маркировки, образования и эффективных систем обращения с отходами. Нормативная база, такая как Директив Европейского Союза о одноразовых пластмассах и различные национальные стратегии, продвигающие биоразлагаемые материалы, сыграли важную роль в ускорении исследований и внедрения.

Новые исследования сосредоточены на комплексных системах и добавках на биологической основе для улучшения функциональности биоразлагаемых полимеров. Такие инновации, как активная и интеллектуальная упаковка, которые содержат противомикробные реагенты и индикаторы, открывают новые возможности для повышения безопасности пищевых продуктов и срока их хранения. Кроме того, интеграция побочных продуктов сельского хозяйства в производство полимеров была определена как экономически эффективный и устойчивый подход.

В дальнейшем подчеркивается необходимость по расширению производства, снижению затрат и улучшению способности этих материалов к биологическому разложению в реальных условиях. Междисциплинарный подход, включающий материаловедение, микробиологию и промышленную инженерию, необходим для преодоления существующих ограничений и обеспечения более широкого внедрения в секторе упаковки пищевых продуктов. Таким образом, несмотря на значительный прогресс, достигнутый в разработке биоразлагаемых полимеров, постоянные инновации и политика поддержки имеют решающее значение для полного раскрытия их свойств в качестве устойчивых альтернатив в пищевой промышленности.

Методология данного исследования направлена на углубленное изучение биоразлагаемых полимеров для упаковки пищевых продуктов, сочетая экспериментальный и аналитический подход для оценки их эксплуатационных характеристик и воздействия на окружающую среду.

Полилактид (PLA) биоразлагаемый полимер, производимый из возобновляемых источников, таких как кукурузный крахмал или сахарный тростник. Обладает высокой прочностью на разрыв, меньшей гибкостью по сравнению с другими материалами, относительно низкая паропроницаемость, обеспечивает защиту для бакалеи, но требуется в улучшении для продуктов с высоким содержанием влаги, умеренная термическая устойчивость при относительно низкой температуре плавления, что может ограничить его использование в высокотемпературных пищевых продуктах. Разлагается в условиях промышленной переработки, но может не так хорошо проявляться при бытовой переработке или на свалках из-за особых требований к утилизации. Имеет относительно низкий углеродный след по сравнению с обычными пластмассами, но может иметь высокие выбросы при производстве из-за энергопотребления интенсивного процесса ферментации. В целом оказывает меньше воздействия, чем пластмассы на нефтяной основе.

Полигидроксиалканоаты (PHA) биополимеры, полученные в результате процессов микробиологических ферментаций, известные своей превосходной способностью к биологическому разложению и механическими свойствами. PHA обеспечивает баланс между прочностью на растяжение и относительным удлинением, обеспечивая лучшую гибкость при сохранении надежных механических свойств, что делает его идеальным для гибкой упаковки пищевых продуктов. Обладает отличными барьерными свойствами, особенно с точки зрения влагостойкости, что важно для упаковки скоропортящихся пищевых продуктов. Высокая термостойкость и широкий температурный диапазон, что делает его более универсальным для различных условий упаковки. Демонстрирует быстрое и полное биологическое разложение в различных средах, включая почву и морской среде. Производство имеет высокие экологические издержки из-за сложности микробиологических ферментаций, но будет иметь значительное преимущество с точки зрения способности к биологическому разложению и воздействия на окружающую среду в конце срока годности. PHA эффективно разлагаться при любых обстоятельствах утилизации, включая свалки и морскую среду, что делает его одним из наиболее экологичным вариантом.

Полимеры на основе крахмала получают из растительных крахмалов, широко используются из-за их способности к биологическому разложению и низкой стоимости. Обладают меньшей механической прочностью, но улучшенной способностью к биологическому разложению. Модификации (например, смешивание с пластификаторами или другими полимерами) повышают их прочность. Могут демонстрировать более высокую проницаемость по сравнению с PLA и PHA, особенно для водяного пара, но их характеристики могут быть улучшены за счет смешивания или покрытия дополнительными барьерными материалами. Обладают низкой термостойкостью по сравнению с синтетическими полимерами, такими как PLA и PHA, что может ограничить их использование в некоторых упаковочных целях. Относительно быстро разлагаются, особенно в условиях компостирования, но могут быть чувствительны к влаге и колебаниям температуры. Оказывают наименьшее воздействие на окружающую среду с точки зрения поиска сырья (поскольку их получают из возобновляемых сельскохозяйственных ресурсов), но все равно могут повлечь за собой высокие затраты из-за обработки и смешивания. Эти материалы быстро разлагаются как при промышленном, так и при утилизация пищевых отходов, но могут выделять метан при утилизации на свалках.

Производные целлюлозы, включая ацетат целлюлозы и регенерированную целлюлозу, обладающие превосходной механической прочностью и прозрачностью, что делает их идеальными для упаковки пищевых продуктов, где требуется баланс между долговечностью и эстетикой. Обладают хорошими свойствами защиты от кислорода и влаги, сравнимыми с обычными пластмассами в определенных областях применения. Эти материалы обла-

дают высокой термостойкостью, что делает их пригодными как для упаковки холодных, так и горячих пищевых продуктов. Материалы на основе целлюлозы обладают умеренной способностью к биологическому разложению, особенно в промышленных условиях, хотя для их разложения может потребоваться больше времени, чем для PHA. Имеет относительно низкий углеродный след, особенно если они получены из экологически чистой древесины или сельскохозяйственных отходов, хотя производство целлюлозы может быть энергоемким. Целлюлоза разлагается в большинстве сред, но ее разложение на свалках может происходить медленнее по сравнению с PHA.

Многокомпонентные смеси – это биоразлагаемых полимеров с натуральными наполнителями (например, целлюлозными волокнами, хитозаном) или наноматериалами (например, наноглинами, графеном) для улучшения механических и барьерных свойств. Эти полимеры обработаны методами экструзии или литья для получения пленок, пригодных для упаковки пищевых продуктов [1].

Отношение потребителей к биоразлагаемой упаковке показывает:

- Высокая осведомленность и интерес к экологичным упаковкам,
- Многие потребители готовы платить больше за биоразлагаемые упаковки
- Эффективность и надежность биоразлагаемых материалов, особенно в отношении стоимости, доступности и эксплуатационных характеристик
- Отношение потребителей к маркировке и четкое информирование об экологических преимуществах биоразлагаемой упаковки.
- Стандарты, сертификации и маркировки для обеспечения соответствия биоразлагаемых материалов критериям охраны окружающей среды и безопасности.

На основании полученной информации можно сделать выводы о том, что PHA и PLA являются перспективными биоразлагаемыми полимерами для упаковки пищевых продуктов, при этом PHA превосходит по способности к биологическому разложению, а PLA по экономической эффективности и безопасности для пищевых продуктов. Полимеры на основе крахмала обладают нуждаются в дальнейших модификациях для улучшения их механических и барьерных свойств. Производные целлюлозы имеют баланс между прочностью, прозрачности и биоразлагаемости, но сталкиваются с проблемами стоимости и охвата.

Объединение биоразлагаемых полимеров в сектор упаковки пищевых продуктов, подчеркнет необходимость продолжения исследования по улучшению их свойств и снижению производственных затрат. Кроме того, нужно подчеркнуть важность поддерживающей нормативно-правовой базы и информирование потребителей для обеспечения успешного внедрения экологически чистых материалов.

Результаты дают всестороннюю оценку биоразлагаемых полимеров в качестве альтернативы традиционной пластиковой упаковки в пищевой

промышленности. Полилактид (PLA), несмотря на ее прозрачность и безопасность для пищевых продуктов, имеет ограничения по гибкости и паропроницаемости, что делает ее более подходящей для упаковки пищевых продукты длительного хранения. Полигидроксиалканоаты (PHA), имеют отличные показатели как механическую прочность, так и барьерные свойства, что делает их материалом для более широкого спектра пищевых продуктов, в том числе с более высоким содержанием влаги. Высокая способность PHA к биологическому разложению еще больше подтверждает его свойства в качестве экологически чистого упаковочного материала.

Полимеры на основе крахмала имеют слабые механические свойства, но можно смешав с другими материалами или включив пластификаторы для повышения гибкости и прочности. Благодаря их экономической эффективности и способности к биологическому разложению, отлично подходят для одноразовой упаковки, особенно в тех случаях, когда высокая прочность не является критическим требованием. Однако их барьерные свойства нуждаются в дальнейшем улучшении, особенно с точки зрения влагостойкости [2].

Производные целлюлозы обладают высокими механическими свойствами и превосходной прозрачностью, что делает их идеальными для упаковки, требующей баланса долговечности и эстетики. Однако более высокие затраты на их производство и более медленная скорость биодеградации по сравнению с PHA могут ограничить их широкое использование, если не будут достигнуты дальнейшие успехи в технологиях переработки.

Одним из основных преимуществ биоразлагаемых полимеров является их минимальный воздействие на окружающую среду по сравнению с обычными пластмассами. Результаты оценки жизненного цикла подтвердили это, показав, что PHA и PLA имеют более низкий углеродный след и расход воды по сравнению с пластиками на нефтяной основе. Однако процессы производства этих биоразлагаемых материалов, особенно PHA, который требует микробиологической ферментации, все еще могут приводить к относительно высокому потреблению энергии и выбросам, что дает возможность для оптимизации.

Полимеры на основе крахмала показали самые низкие экологические затраты с точки зрения поиска сырья, поскольку они производятся из возобновляемых сельскохозяйственных продуктов. Однако энергоемкая обработка, связанная с их производством, и потребность в пластификаторах для улучшения их механических свойств могут компенсировать некоторые экологические выгоды [4].

С истечением срока годности биоразлагаемые полимеры, такие как PHA, имеют явное преимущество, поскольку они эффективно разлагаются на полигонах и в условиях переработки органических отходов, способствуя снижению многолетнего загрязнения окружающей среды. PLA, хотя и поддается биологическому разложению на промышленных установках для пе-

реработки органических отходов, сталкивается с проблемами при непромышленном переработки органических отходов и на полигонах, где он может разлагаться гораздо медленнее.

Несмотря на многообещающие результаты, биоразлагаемые полимеры для упаковки пищевых продуктов сохраняет ряд проблем. Одним из основных препятствий является более высокая стоимость производства биоразлагаемых материалов по сравнению с обычными пластмассами. PLA и PHA, в частности, являются в настоящее время более дорогим из-за сложности производственных процессов. Хотя ожидается, что затраты снизятся с развитием производственных технологий и экономией за счет масштаба, они попрежнему представляют собой препятствие для широкого внедрения. Другой проблемой является стабильность эксплуатационных характеристик биоразлагаемых полимеров в реальных условиях. Хотя многие из протестированных материалов продемонстрировали адекватные свойства в лабораторных условиях, изменчивость скоростей биодеградации в зависимости от факторов окружающей среды (например, температуры, влажности и микробиологической активности) может осложнить их использование в различных географических регионах с различной инфраструктурой для отходов.

Необходимы дальнейшие исследования для разработки стандартизированных методов тестирования, позволяющих прогнозировать, как поведут себя биоразлагаемые материалы в различных условиях утилизации. Информирование потребителей и управления отходами должны развиваться для поддержки биоразлагаемой упаковки. Системы для отделения биоразлагаемых материалов от традиционных пластиковых отходов имеют решающее значение для успешного внедрения биоразлагаемой упаковки. Без этих систем биоразлагаемые полимеры могут оказаться на свалках, где они разлагаются гораздо медленнее, сводя на нет их экологические преимущества [3].

Будущее биоразлагаемых полимеров в пищевой промышленности зависит от решения проблем, связанных с затратами, производительностью и утилизацией. Будущие исследования должны быть сосредоточены на:

- Улучшении свойств полимеров: разработке новых рецептур, таких как смеси полимеров или включение наноматериалов, для улучшения механической прочности, барьерных свойств и скорости биоразложения биоразлагаемых полимеров.
- Снижение затрат: определение более рентабельных методов производства биоразлагаемых материалов, таких как использование побочных продуктов сельского хозяйства, оптимизация процессов ферментации или расширение производства за счет более эффективных производственных технологий.
- Исследования биоразложения в реальных условиях: Проведение длительных исследований в различных условиях окружающей среды для лучшего понимания динамики биоразложения и воздействия биоразлагаемых полимеров на окружающую среду.

- Нормативная поддержка: распространение четких и стандартизированных глобальных правил в отношении биоразлагаемой упаковки для облегчения принятия рынком и стимулирования разработки экологически чистых упаковочных решений.

Данная работа подчеркивает значительный потенциал биоразлагаемых полимеров для замены традиционных пластмасс в индустрии упаковки пищевых продуктов, обеспечивая экологически устойчивое решение проблемы пластиковых отходов. Однако для полной реализации этого потенциала необходимы дальнейшие усовершенствования свойств полимеров, методов производства и систем обращения с отходами. Решая эти проблемы и используя благоприятную нормативно-правовую базу, биоразлагаемые полимеры могли бы стать ключевым компонентом более устойчивой индустрии упаковки пищевых продуктов, способствуя снижению загрязнения окружающей среды и продвигая практику экономики замкнутого цикла.

В работе предоставлена была подробное описание биоразлагаемых полимеров как экологически чистых альтернатив обычной пластиковой упаковке в пищевой промышленности. Полученные результаты подтверждают, что биоразлагаемые полимеры, такие как полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA), полимеры на основе крахмала и производные целлюлозы, обладают значительным потенциалом для снижения воздействия на окружающую среду и поддержки усилий по обеспечению устойчивого развития в секторе упаковки.

Чтобы в полной мере использовать потенциал биоразлагаемых полимеров, в будущем исследования должны быть сосредоточены на улучшении свойств материалов, снижении производственных затрат и повышении способности к биологическому разложению в различных условиях окружающей среды. Кроме того, расширение инфраструктуры и внедрение четких стандартизированных правил будут иметь ключевое значение для обеспечения надлежащей утилизации биоразлагаемых полимеров и содействия достижению целей устойчивого развития. В заключение, биоразлагаемые полимеры представляют собой многообещающее решение глобального кризиса пластиковых отходов в пищевой промышленности. Однако для их широкого внедрения потребуется преодоление технических, экономических и логистических проблем. Благодаря постоянным инновациям, политике поддержки и признанию потребителями биоразлагаемых полимеров они могут сыграть ключевую роль в превращении упаковки пищевых продуктов в более устойчивую и экологичную отрасль. Переходя на эти материалы, сектор упаковки пищевых продуктов может внести значительный вклад в сокращение загрязнения пластиком и достижение целей экономики замкнутого цикла.

Список литературы

1. Васильев И. Ю. Создание плёночных композиций на основе синтетических и природных полимеров с приданием им свойства биоразлагаемости. Диссертация на соискание учёной степени кандидата наук. – 2024.
2. Дышлюк Л. С. Теоретическое обоснование и практическая реализация технологий получения антимикробных плёнок на основе полисахаридов и их производных для пищевой промышленности. Диссертация на соискание учёной степени доктора наук. – 2021.
3. Исмоилов И. Б. Технология получения, структура и физико-химические свойства биоразлагаемых полимерных композитов на основе глюкоманнана и зеина. Диссертация на соискание учёной степени кандидата наук. – 2022.
4. Потороко И. Ю., Малинин А. В., Цатуров А. В., Удей Б. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 1.// Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2023. – № 2. – С. 15–25.

Карагадян А.Н.
аспирант
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, Калининград
a.karagadian2001@gmail.com

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ СООТВЕТСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Статья посвящена разработке интеллектуального агента для автоматизированного контроля соответствия технической документации на полиэтиленовые газораспределительные системы действующим нормативным требованиям. Актуальность исследования обусловлена высокой сложностью и объёмом нормативной базы, регулирующей проектирование, строительство и эксплуатацию полиэтиленовых газопроводов, а также значительными временными и трудовыми затратами при ручной проверке технической документации. В работе проведён анализ существующих подходов к верификации технической документации и выявлены их ключевые недостатки: субъективность, низкая скорость обработки и высокая вероятность пропуска несоответствий. В качестве решения предложена архитектура ИИ-агента на основе технологии RAG (Retrieval-Augmented Generation), объединяющей векторную базу знаний из актуальных нормативных документов и большую языковую модель для семантического анализа и сравнения. Разработанный агент принимает техническую документацию в различных форматах, извлекает ключевые технические параметры, сопоставляет их с требованиями нормативов и формирует структурированный протокол выявленных несоответствий. Представлена планируемая методология апробации системы и обоснован выбор оценочных метрик. Сделан вывод о перспективности интеграции разработанного инструмента в систему управления качеством газораспределительных организаций.

Ключевые слова: ИИ-агент, техническая документация, полиэтиленовые газораспределительные системы, контроль соответствия, RAG-архитектура, большие языковые модели, управление качеством, нормативные требования, автоматизация, газопроводы.

Karagadyan A.N.
Postgraduate Student
Immanuel Kant Baltic Federal University
Russia, Kaliningrad
a.karagadian2001@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN AI AGENT FOR AUTOMATED COMPLIANCE CONTROL OF TECHNICAL DOCUMENTATION FOR POLYETHYLENE GAS DISTRIBUTION SYSTEMS

Abstact. The article is devoted to the development of an intelligent agent for automated control of the compliance of technical documentation for polyethylene gas distribution systems with current regulatory requirements. The relevance of the study is due to the high complexity and volume of the regulatory framework governing the design, construction and operation of polyethylene gas pipelines, as well as significant time and labor costs for manual verification of technical documentation. The paper analyzes existing approaches to technical documentation verification and identifies their key shortcomings: subjectivity, low processing speed and high probability of missing non-conformities. As a solution, an AI agent architecture based on RAG (Retrieval-Augmented Generation) technology is proposed, combining a vector knowledge base of current regulatory documents and a large language model for semantic analysis and comparison. The planned aprobation methodology and the rationale for the choice of evaluation metrics are presented.

Keywords: AI agent, technical documentation, polyethylene gas distribution systems, compliance control, RAG architecture, large language models, quality management, regulatory requirements, automation, gas pipelines.

Полиэтиленовые газораспределительные системы занимают ключевое место в инфраструктуре газоснабжения России: доля ПЭ-трубопроводов в объёме вновь прокладываемых сетей превышает 80% благодаря их коррозионной стойкости, технологичности монтажа и длительному сроку службы [1].

Действующая нормативная база – ГОСТ Р 58121 (части 1–3), СП 62.13330,2011, технические условия изготовителей и регламенты надзорных органов [2, 3] – регулярно обновляется, что существенно усложняет задачу верификации документации. В настоящее время этот процесс осуществляется преимущественно вручную, что сопряжено с высокой трудоёмкостью и риском пропуска несоответствий. Развитие больших языковых моделей (LLM) открывает принципиально новые возможности для его автоматизации [4, 5].

Целью исследования является разработка ИИ-агента для автоматизированного контроля соответствия технической документации на полиэтиленовые газораспределительные системы нормативным требованиям. Решаемые задачи:

– анализ существующих методов верификации технической документации;

– формирование структурированной базы знаний из актуальных нормативных документов;

– проектирование архитектуры ИИ-агента и разработка алгоритмов сопоставления;

– разработка методологии апробации и обоснование системы оценочных метрик.

На начальном этапе был проведён анализ трёх классов решений для верификации документации. Системы на основе правил (rule-based) точны для стандартизированных форматов, но не способны обрабатывать произвольный текст. Системы информационного поиска находят релевантные нормативные фрагменты, но не выполняют анализ соответствия. Решения на основе LLM без внешнего контекста могут генерировать ошибочные нормативные требования [5, 6]. Ни один из подходов в отдельности не обеспечивает требуемого уровня, что обусловило выбор архитектуры RAG.

Разработанный ИИ-агент построен на основе архитектуры RAG (Retrieval-Augmented Generation), объединяющей векторный поиск по базе знаний с генеративными возможностями LLM [4]. Взаимосвязь компонентов системы представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Архитектура ИИ-агента для контроля соответствия технической документации

База знаний формируется из СП 62.13330,2011, ГОСТ Р 58121.1–3 и технических условий изготовителей. Документы разбиваются на смысловые фрагменты, векторизуются многоязычной моделью эмбеддингов [8] и размещаются в векторной базе данных.

Модуль обработки принимает документацию в форматах PDF, DOCX и XML и извлекает технические параметры – регулярными выражениями для структурированных разделов и LLM-парсингом для произвольного текста. По каждому параметру семантический поиск извлекает релевантные нормативные фрагменты, которые передаются в модуль LLM-анализа; тот

формирует заключение о соответствии со ссылкой на конкретный пункт документа. Результаты агрегируются в итоговый протокол несоответствий [9, 10].

Работа агента включает пять последовательных шагов (рисунок 1): (1) загрузка и предобработка документации; (2) извлечение параметров; (3) семантический поиск требований; (4) LLM-анализ соответствия; (5) формирование протокола. При неоднозначности агент самостоятельно формулирует уточняющие запросы к базе знаний без вмешательства оператора [10].

Планируемая апробация и метрики оценки

Апробация ИИ-агента предусматривает формирование выборки из 20–30 комплектов проектной документации на объекты газораспределения с полиэтиленовыми трубопроводами, охватывающих объекты различной сложности. Получение исходных материалов планируется при содействии отраслевых организаций (в частности, через ВНИИСТ).

Для обеспечения достаточного объёма тестовой выборки будет применена аугментация данных: на основе имеющихся комплектов создадут модифицированные копии с намеренно внесёнными несоответствиями требованиям ГОСТ Р 58121 и СП 62.13330, что позволит контролируемо оценить способность агента выявлять конкретные категории нарушений.

В качестве эталона планируется использование документации, прошедшей государственную экспертизу в Главгосэкспертизе России: положительное заключение служит объективным подтверждением соответствия нормативным требованиям без привлечения субъективного экспертного мнения.

Общая методология апробации и система оценочных метрик представлены на рисунке 2.

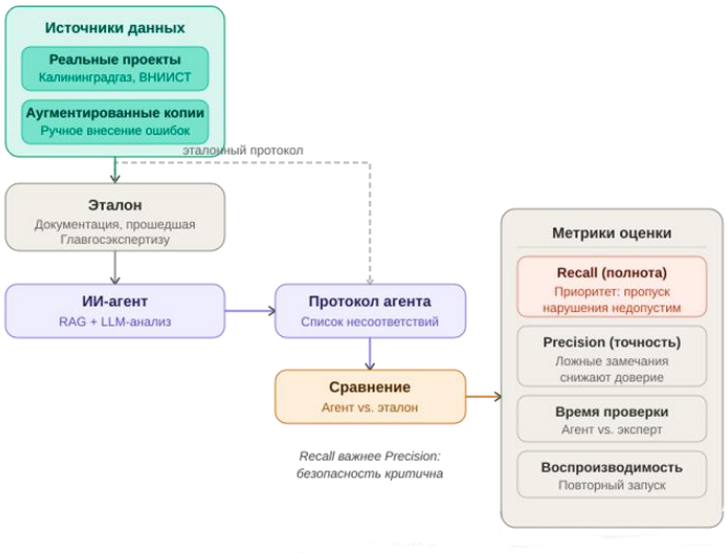


Рис. 2. Методология апробации ИИ-агента и система оценочных метрик

Для оценки эффективности ИИ-агента планируется применение следующих метрик.

Полнота (Recall) – доля реальных несоответствий, выявленных агентом, от общего числа несоответствий в эталонном протоколе. В контексте безопасности газораспределительных систем Recall является приоритетной метрикой: пропуск нарушения потенциально опаснее ложного замечания, поэтому при настройке системы ему отдаётся предпочтение даже при некотором снижении Precision.

Точность (Precision) – доля обоснованных замечаний, в общем числе сформированных агентом. Избыточные ложноположительные срабатывания снижают практическую ценность системы и доверие к её результатам.

Сокращение времени проверки – среднее время работы агента на один комплект документации в сравнении с нормативами ручной проверки.

Воспроизводимость результатов – стабильность результатов при повторных запусках на одних и тех же комплектах. В отличие от ручной проверки, существенно зависящей от конкретного эксперта, автоматизированная система обеспечивает объективно воспроизводимый результат.

В работе представлена разработка ИИ-агента для автоматизированного контроля соответствия технической документации на полиэтиленовые газораспределительные системы нормативным требованиям на основе архитектуры RAG. Сформирована база знаний из ключевых нормативных документов, спроектирован пятиэтапный алгоритм работы агента, разработана методология апробации с применением реальной и аугментированной проектной документации.

В системе метрик приоритет отдаётся Recall как критически важному показателю для задач промышленной безопасности; объективность оценки обеспечивается использованием в качестве эталона документации, прошедшей государственную экспертизу Главгосэкспертизы России. Дальнейшие направления работы: проведение апробации, расширение базы знаний, разработка механизма её автоматической актуализации и интеграция с системами электронного документооборота.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50838-2009. Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2010,
2. ГОСТ Р 58121.1-2018. Системы газораспределительные. Функциональные характеристики. Часть 1. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019.
4. ГОСТ Р 58121.2-2018. Системы газораспределительные. Трубопроводы из полиэтилена. Часть 2. Трубы. – М.: Стандартинформ, 2019.
5. ГОСТ Р 58121.3-2018. Системы газораспределительные. Трубопроводы из полиэтилена. Часть 3. Соединительные детали. – М.: Стандартинформ, 2019.
6. СП 62.13330,2011. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002. – М., 2011.
7. Lewis P., Perez E., Piktus A. [и др.]. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020, – Vol. 33. – С. 9459–9474.
8. Zhao W.X., Zhou K., Li J. [и др.]. A Survey of Large Language Models. – 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2303.18223 (дата обращения: 01.03.2025).

9. Gao Y., Xiong Y., Gao X. [и др.]. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey. – 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2312.10997 (дата обращения: 01.03.2025).

10. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding // Proceedings of NAACL-HLT. – 2019. – С. 4171–4186.

11. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks // Proceedings of EMNLP. – 2019. – С. 3982–3992.

12. Karpukhin V., Oğuz B., Min S. [и др.]. Dense Passage Retrieval for Open-Domain Question Answering // Proceedings of EMNLP. – 2020, – С. 6769–6781.

13. Edge J., Trinh Q., Cheng N. [и др.]. From Local to Global: A Graph RAG Approach to Query-Focused Summarization. – 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2404.16130 (дата обращения: 01.03.2025).

14. Shi W., Min S., Yasunaga M. [и др.]. REPLUG: Retrieval-Augmented Language Model Pre-Training. – 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2301.12652 (дата обращения: 01.03.2025).

15. Клюев А.С., Глазов М.М. Методы технической диагностики: учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 320 с.

16. Салтыков С.А. Управление качеством: учебник. – М.: РИОР, 2020, – 418 с.

Панов А.Н.
к.т.н., главный эксперт
ЮРС-РУСЬ
Россия, Санкт-Петербург
a.panov@tut.by
Ромашова Е.Ю.
младший научный сотрудник
ИМАШ РАН
Россия, Москва
romashova@imash.ru
Гиршфельд П.А.
аспирант
ИМАШ РАН
Россия, Москва
pavel.girshfeld@yanex.ru

РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МАШИНОСТРОЕНИИ И СВЯЗАННЫХ ОТРАСЛЯХ. ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ДОСТИЖЕНИЯ ПРИЕМЛЕМЫХ РИСКОВ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы используемых моделей управления рисками и процессного подхода в международных (ISO 9001) и государственных стандартах на системы менеджмента качества. Известно, что внутренние и внешние факторы в рамках среды функционирования организации могут создавать риски и возможности, которые могут повлиять на ее способность достигать намеченных результатов. Поэтому необходимо оптимальным образом предотвращать или уменьшать нежелательные последствия для обеспечения достижения поставленных целей. Риски и возможности, которые необходимо учитывать, являются исходными данными для планирования действий

и установления целей и т.д. Соответственно для этого необходимо определять оптимальные величины и выделять ресурсы для достижения приемлемых рисков для взаимосвязанных уровней организации и ее цепи поставок. Необходимо обеспечить результативно и эффективно достигать цели социально-экономического развития организации.

Ключевые слова: качество, проектно-процессный подход, стандартизация, риски, цели, оптимизация, машиностроение.

Panov A.N.
Candidate of Technical Sciences, Chief Expert
URS-RUSS
Russia, Saint-Petersburg
a.panov@tut.by
Romashova E.Yu.
Junior Researcher
IMASH RAS
Russia, Moscow
romashova@imash.ru
Girshfeld P.A.
Postgraduate Student
IMASH RAS
Russia, Moscow
girshfeld@hotmail.com

DEVELOPMENT OF A MULTI-LEVEL RISK MANAGEMENT MODEL IN MECHANICAL ENGINEERING AND RELATED INDUSTRIES. LOGICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL ACHIEVEMENT OF ACCEPTABLE RISKS

Abstract. The article discusses the problems of risk management models and the process approach used in international (ISO 9001) and state standards for quality management systems. It is known that internal and external factors within the organization's operating environment can create risks and opportunities that can affect the organization's ability to achieve its intended results. Therefore, it is necessary to optimally prevent or reduce undesirable consequences and ensure that the goals set are achieved. The risks and opportunities that need to be considered are the starting data for planning actions and setting goals, etc. Accordingly, it is necessary to determine the optimal allocation of the required resources for the interrelated levels (at which specific risks arise) of the organization and the supply chain, while ensuring the effectiveness and efficiency of the socio-economic development of the organization at acceptable risks.

Keywords: quality, design and process approach, standardization, risks, goals, optimization, mechanical engineering.

Проведенный анализ используемых методологии, моделей систем менеджмента качества организаций (основанных на стандарте ISO 9001 и проекте 2026 г.), менеджмента рисков (стандарты серии ISO 31000), а также традиционных и новых методик (например, SWOT, PESTLE, 5 Сил Портера) применяемых при разработке бизнес-планов, а также для анализа конструкторско-технологических рисков (например, FMEA) позволяет сделать ряд выводов. Применение моделей и методик во взаимосвязи методологически не подкреплено как на уровнях системы управления организацией, так и на

этапах ее жизненного цикла, проектов, а также жизненного цикла продукции. Необходимо разрабатывать новые и совершенствовать используемые методики как анализа рисков, так и синтеза выбора оптимальных решений для повышения результативности и эффективности деятельности организации и ее цепи поставок [1–18].

Следует отметить, что без установления в государственных стандартах и на практике взаимосвязанных методик, их применение будет недостаточно результативно и т.п. [1–18].

Для разработки моделей и методологии рискориентированного проектно-процессного подхода использованы, либо развитые следующие термины с соответствующими определениями:

стандарт (standard): оптимальным образом упорядоченная, повторяющаяся деятельность при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами.

В действующем законодательстве может использоваться иное определение термина. Данное определение применяется в рамках рискориентированного мышления.

угроза (threat): потенциальный источник опасности, вреда или другого нежелательного результата (ISO 31073).

ущерб (damage): потенциальная или фактическая потеря.

При этом:

1 Ущерб по значимости может быть пренебрежимым, приемлемым и чрезмерным.

2 Ущерб по воздействию может быть прямым, косвенным и отдаленным.

3 Ущерб в конечном итоге при анализе рисков имеет финансовый эквивалент.

уязвимость (vulnerability): непригодность системы противостоять угрозам при достижении цели.

фрактал (fractal) <система менеджмента>: упорядоченная, устойчивая информационная структура/код, задающая возможности и ограничения для взаимодействия/развития открытых самоорганизующихся сложных социотехнических систем путем синтеза подобных себе структур на различных уровнях их иерархии, позволяющая оптимально обеспечивать требуемую результативность/эффективность и защищенность.

цель (objective): результат, который будет достигаться (СТБ ISO 9000).

эффективность (efficiency): связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами (ISO 9000).

Для определения оптимального выделения требуемых ресурсов для взаимосвязанных уровней (на которых возникают специфические риски) организации и цепи поставок при этом обеспечить результативность и эффективность социально-экономического развития организации при приемлемых рисках разработаны методология и многоуровневые модели управления рисками в машиностроении и связанных отраслях:

Многокомпонентная рискориентированная модель оптимизации продукции и процессов: «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб» (рис. 1);

Структура управления рисками на основе их предупреждения и парирования с учетом бифуркации и вариации процесса (рис. 2);

Структуры анализа рисков процесса на основе идентификации этапов: вызовы, угрозы, уязвимости и ущербы (рис. 3);

Модель оптимизации затрат на достижение приемлемых рисков на основе действий по отношению к несоответствиям: инвестиции в мониторинг; идентификация интегральных ущербов; инвестиции в предупреждение (рис. 4);

Модель развития культуры организации с учетом рисков событий, вариаций и бифуркаций (рис. 5);

Модель рискориентированного проектно-процессного подхода – жизненный цикл организации и проектов (рис. 6);

Модель оценивания интегрального ущерба – прямые, косвенные и отдаленные риски (рис. 7);

Модель оптимизации стоимости владения для конечного потребителя продукции путем приоритизации характеристик и управления вариацией (рис. 8).

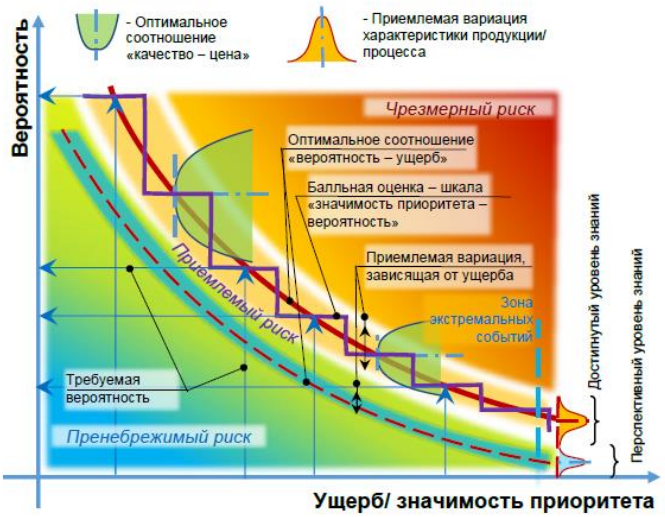


Рис. 1. Многокомпонентная рискориентированная модель оптимизации продукции и процессов: «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб»

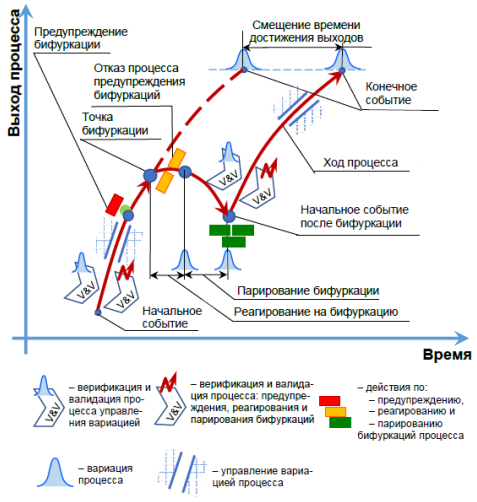


Рис. 2. Структура управления рисками на основе их предупреждения и парирования с учетом бифуркации и вариации процесса

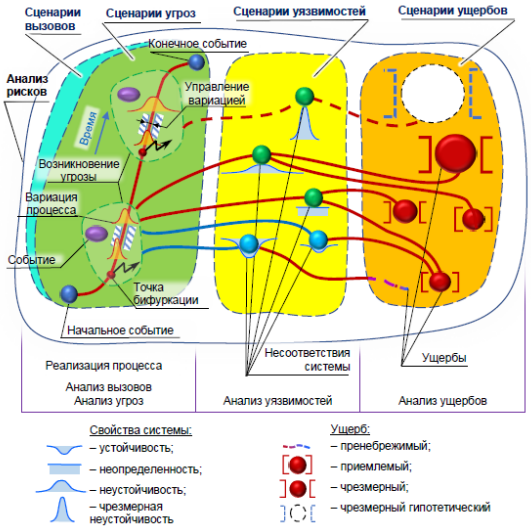


Рис. 3. Структуры анализа рисков процесса на основе идентификации этапов: вызовы, угрозы, уязвимости и ущербы

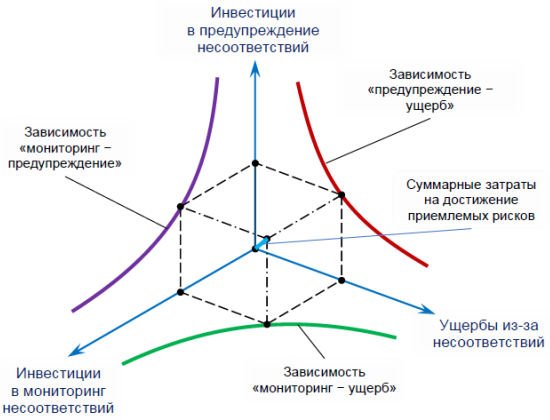


Рис. 4. Модель оптимизации затрат на достижение приемлемых рисков на основе действий по отношению к несоответствиям: инвестиции в мониторинг; идентификация интегральных ущербов; инвестиции в предупреждение



Рис. 5. Модель развития культуры организации с учетом рисков событий, вариаций и бифуркаций

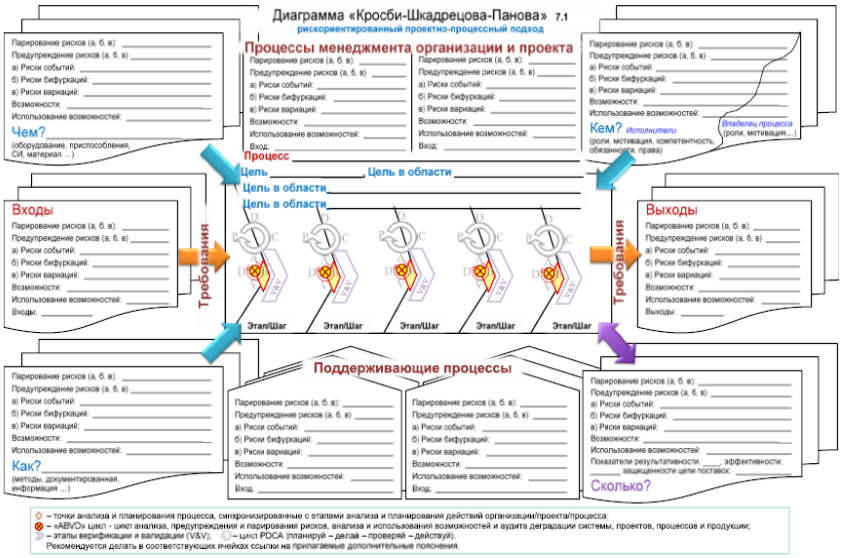


Рис. 6. Модель рискориентированного проектно-процессного подхода – жизненный цикл организации и проектов

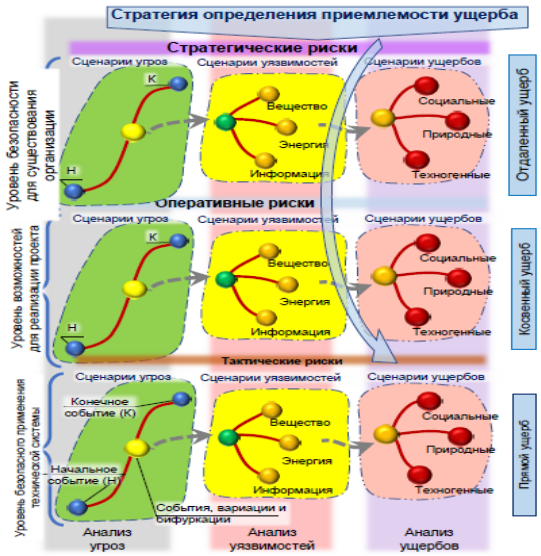


Рис. 7. Модель оценивания интегрального ущерба – прямые, косвенные и отдаленные риски

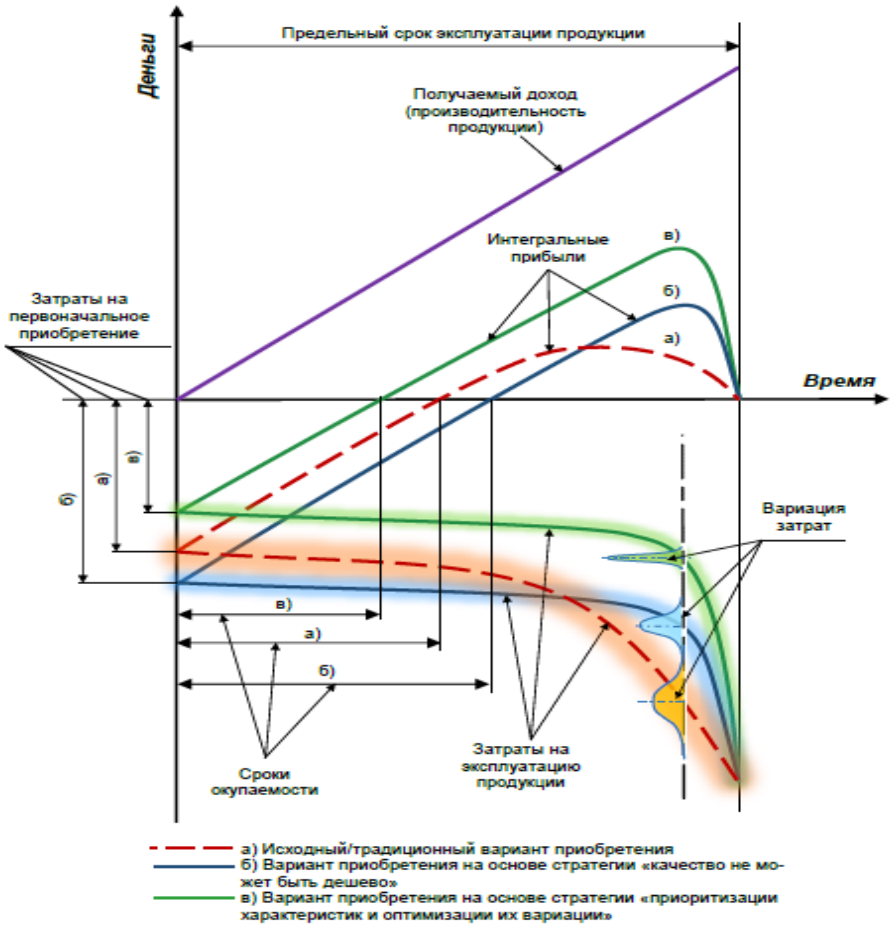


Рис. 8. Модель оптимизации стоимости владения для конечного потребителя продукции путем приоритизации характеристик и управления вариацией

Предложена логико-математическая / экономико-математическая модель оптимального достижения приемлемых рисков в рамках многоуровневой модели управления рисками организации в цепи поставок. Модель учитывает последствия наступления рискового события (социальные, техногенные, природные), интегральное оценивание риска (для различных уровней организации, например, бизнес-направления/ аспекты; проекты; бизнес-процессы, а также процессы менеджмента качества; конструкторско-технологические отказы и т.д.). Следует учитывать связанные компоненты, такие как потери из-за реализации рисков, затраты на контроль и испытания, затраты на управление рисками и т.д. (рис.1–8).

Целевой функцией (в конечном итоге) при этом является оптимальная себестоимость – в рамках критерия «качество- цена – приемлемые риски».

Традиционно, себестоимость состоит из прямых и косвенных затрат. Производственные затраты включают: затраты на материалы, зарплату и т.д. Предлагается развить подход о включении в качестве компонента в расчет себестоимости затраты на управление рисками в рамках многоуровневой модели. Затраты на управления рисками в цепи поставок включают суммарные затраты и учитывают риски: уровни организации, проекты, про-

цессы управления, конструкторско-технологические отказы, сценарии событий и т.д. Таким образом, следует оптимизировать (инвестиции и ущербы) затраты на обеспечение защищенности.

Разработаны методология, система взаимосвязанных моделей управления рисками в машиностроении, в связанных отраслях, а также логико-математическая / экономико- математическая модель оптимального достижения приемлемых рисков: многокомпонентная рискориентированная модель оптимизации продукции и процессов: «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб»; структура управления рисками на основе их предупреждения и парирования с учетом бифуркации и вариации процесса; структура анализа рисков процесса на основе идентификации этапов: вызовы, угрозы, уязвимости и ущербы;

Модель оптимизации затрат на достижение приемлемых рисков на основе действий по отношению к несоответствиям: инвестиции в мониторинг; идентификация интегральных ущербов; инвестиции в предупреждение; модель развития культуры организации с учетом рисков событий, вариаций и бифуркаций; модель рискориентированного проектно-процессного подхода – жизненный цикл организации и проектов; модель оценивания интегрального ущерба – прямые, косвенные и отдаленные рисков; модель оптимизации стоимости владения для конечного потребителя продукции путем приоритизации характеристик и управления вариацией.

Предложена логико-математическая/ экономико-математическая модель оптимального достижения приемлемых рисков в рамках многоуровневой модели управления рисками. Целевой функцией при этом является оптимальная себестоимость – в рамках критерия «качество- цена – приемлемые риски». Таким образом, предложено оптимизировать (инвестиции и ущербы) затраты на обеспечение защищенности.

Научный доклад выполнен в рамках выполнения научной темы FFGU-2024-0024.

Список литературы

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности/ Под общ. ред. Махутова Н.А.- М.: МГФО «Знание», 2015, – 936 с., ил.

2. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность сложных человеко-машинных систем. Под общ. редакцией В.А. Боришпольца. Научный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, – М.: МГОФ «Знание», 2021. – 432 с.

3. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и науч-но-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта». Техногенная безопасность подвижного состава железнодорожного транспорта. Раздел II Науч-ный рук. издания чл. корр. РАН Н.А. Махутов, – М.: МГОФ «Знание», 2020, – 488 с.

4. Махутов, Н.А. Совершенствование научной базы и нормативного обоснования безопасности колесных мобильных машин/Н.А. Махутов, А.Н. Панов О.Н. //Проблемы безопас-ности и чрезвычайных ситуаций. – 2021, №1. С. 34–43.

5. Лепихин А.М., Морозов Е.М., Махутов Н.А., Лещенко В.В. Возможности оценки вероятностей разрушения и допустимых размеров дефектов элементов конструкций по критериям механики разрушения. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022;88(3): С. 41–50,

6. Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Румянцева Е.А., Гадолина И.В. Метод оценки долговечности конструкций при стационарном и нестационарном случайных нагружениях с применением вариационной модовой декомпозиции. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024;90(9): С. 63–74

7. Горбацевич М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/М.И. Горбацевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; под общей ред. А.Н. Панова. – Мн.: «Технопринт», 2005г.–264 с.:ил.

8. Панов А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография/А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрецов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общей ред. А.Н. Панова. – Минск: БГАТУ, 2009. – 486 с.: ил.

9. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Складнова М.С. К вопросу о рисках применения цифровых моделей в машиноведении. В сборнике: Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды VIII Международной научной конференции. Москва, 2024. С. 172–173.

10, Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Рискориентированный проектно-процессный подход – системная основа конкурентоспособности машиностроения. В сборнике: Человеческий капитал в новой реальности. материалы пленарной международной научно-практической конференции в рамках VI международного Московского академического экономического форума «Российская экономика 2024+: новые решения в новой реальности». Москва, 2024. С. 89–97.

11. Потапов А.И. Контроль качества и прогнозирование надежности конструкций из композитных материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 198.- 261 с., ил.

12. Гребенник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): Справочник. – М.: Металлургия, 1989 .592 с.

13. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Издательство стандартов, 1989 – 224 с.

14. Зорин В. А. Основы работоспособности технических систем: Учебник для вузов / В.А. Зорин. М.: ООО «Магистр – Пресс», 2005. 536 с.

15. Зорин В.А. Надежность механических систем.: Учебник. – М.: ИНФРА- М, 205.- 380 с.

16. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изднлий. – М.: Олита, 2003.- 472 с.

17. Гринчар Н.Г. Надежность гидроприводов строительных, путевых и подъемно-транспортных маши: учебник. – М.: ООО «Издательский дом «Автограф», 2016. – 368 с.

18. Берестнев О.В. Нормирование надежности технических систем: Монография/ О.В. Берестнев, Ю.Л. Солитерман, А.М. Гоман – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 266 с.

Чернова Т.Г.
специалист импортных закупок
ООО «Техносервис»
Россия, Москва
chernova-76@mfil.ru
Савостикова О.Г.
старший преподаватель кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
o.g.savostik@mail.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗАКУПАЕМОЙ ПРОДУКЦИИ В ООО «ТЕХНОСЕРВИС»

Аннотация. В статье рассматривается процесс разработки и внедрения комплексной системы оценки качества закупаемой продукции на примере деятельности ООО «Техносервис». Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности закупочной деятельности в условиях высокой конкуренции на рынке высокотехнологичного оборудования. Неэффективная система контроля качества приводит к прямым финансовым потерям, связанным с возвратами, ремонтом и простоями производства, а также к снижению лояльности клиентов.

Ключевые слова: оценка качества, закупочная деятельность, методы контроля, ключевые показатели эффективности (KPI), входной контроль, управление качеством, поставщики, оптимизация процессов.

Chernova T.G.
Import Procurement Specialist
Technoservice LLC
Russia, Moscow
chernova-76@mfil.ru
Savostikova O.G.
Senior Lecturer of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
o.g.savostik@mail.ru

DEVELOPMENT OF A QUALITY ASSESSMENT SYSTEM FOR PURCHASED PRODUCTS AT TECHNOSERVICE LLC

Abstact. The article discusses the process of developing and implementing a comprehensive quality assessment system for purchased products using the example of the activities of Technoservice LLC. The relevance of the research is determined by the need to increase the efficiency of procurement activities in highly competitive conditions in the market of high-tech equipment. An ineffective quality control system leads to direct financial losses related to returns, repairs, and production downtime, as well as reduced customer loyalty.

Keywords: quality assessment, procurement activities, control methods, key performance indicators (KPIs), input control, quality management, suppliers, process optimization.

В современных условиях рыночной конкуренции качество закупаемой продукции становится одним из ключевых факторов успеха производственного предприятия. Для ООО «Техносервис», специализирующегося на поставках высокотехнологичного оборудования и комплектующих, вопросы обеспечения соответствия товаров установленным стандартам приобретают особую значимость. Неэффективная система оценки качества закупок приводит к увеличению доли брака, росту затрат на возвраты и ремонт, а также к снижению лояльности клиентов.

В связи с этим возникает научная и практическая задача разработки единой системы методов и критериев, позволяющей объективно и системно оценивать качество поступающей продукции, выявлять риски и своевременно реагировать на отклонения. Целью данной работы является создание эффективной методики оценки качества закупаемых товаров, способствующей повышению эффективности закупок и снижению рисков получения некачественных материалов или оборудования.

Методы

Разработка системы методов оценки качества закупаемой продукции осуществлялась поэтапно с использованием комплексного подхода.

1. Анализ текущей ситуации

На первом этапе был проведён детальный анализ существующих процессов закупки и контроля качества в ООО «Техносервис». Использовались методы наблюдения за рабочими процессами, анализа внутренней отчётности (журналы входного контроля, акты о браке) и проведения интервью с сотрудниками отдела закупок, склада и производства. Это позволило выявить основные проблемы: высокую долю несоответствий спецификациям (до 12% по отдельным категориям), задержки в приёмке из-за ручных проверок и отсутствия единых стандартов оценки.

2. Определение целей и задач

На основе анализа были сформулированы цели внедрения новой системы:

- Снижение уровня дефектной продукции не менее чем на 20% в течение первого года.
- Оптимизация затрат на контроль и возвраты на 15%.
- Повышение удовлетворённости внутренних потребителей (производственных цехов) качеством поставок.

3. Выбор критериев оценки и разработка KPI

Для достижения поставленных целей была разработана система ключевых показателей эффективности (*KPI*). Критерии оценки были разделены на технические (соответствие чертежам), эксплуатационные (надёжность) и экономические (затраты на исправление).

Для измерения процента брака использовались следующие *KPI*:

• **Доля бракованной продукции в общем объёме закупок:** отношение количества единиц продукции с критическими дефектами к общему количеству закупленных единиц за период.

• **Количество выявленных дефектов на 100 единиц продукции:** показатель для сравнения качества поставок от разных поставщиков.

• **Процент брака по критическим параметрам:** доля дефектов, способных привести к остановке производства или нарушению безопасности.

• **Доля возвратов поставщику по причине брака:** процент продукции, возвращённой из-за несоответствий после приёмки.

4. Разработка процедур контроля качества

Были формализованы процедуры трёхуровневого контроля:

1. **Входной контроль:** проверка каждой партии при поступлении на склад по утверждённому чек-листу.
2. **Текущий мониторинг:** выборочный контроль в процессе использования комплектующих в производстве.
3. **Выходной контроль:** проверка готовой продукции перед отгрузкой конечному потребителю.

5. Внедрение инструментов контроля

Для повышения объективности и эффективности контроля были внедрены следующие инструменты:

• **Статистическое управление процессами (*SPC*):** для мониторинга стабильности процессов поставок и выявления отклонений на ранней стадии.

• ***FMEA*-анализ (*Failure Mode and Effects Analysis*):** для анализа потенциальных причин брака и разработки превентивных мер.

• **Диаграммы Парето:** для выявления наиболее значимых причин дефектов («жизненно важное меньшинство»).

6. Обучение персонала

Ключевым фактором успеха стало обучение персонала новым процедурам и работе с инструментами контроля. Были разработаны инструкции и проведены тренинги для сотрудников склада, отдела закупок и службы качества для обеспечения единообразия подходов.

7. Мониторинг и улучшение

Система предусматривает регулярный (ежемесячный) мониторинг значений *KPI*. На основе анализа данных проводятся корректирующие действия: работа с поставщиками-нарушителями, пересмотр критериев приёмки или изменение процедур контроля.

Внедрение разработанной системы методов позволило достичь следующих результатов:

1. **Снижение доли бракованной продукции:** уровень брака был снижен на **25%** (с 12% до 9% по проблемным категориям) за счёт внедрения входного контроля по новым критериям.

2. **Сокращение времени на устранение неисправностей:** благодаря использованию *SPC* и *FMEA*, среднее время на устранение дефектов сократилось на **15%**.

3. **Повышение прозрачности взаимодействия с поставщиками:** были разработаны единые требования к качеству (технические задания) и процедурам приёмки, что позволило вести предметный диалог с поставщиками о качестве их продукции.

4. **Экономический эффект:** снижение затрат на возвраты и гарантийное обслуживание составило **18%** за первый год внедрения системы.

5. **Повышение удовлетворённости:** внутренние опросы показали рост удовлетворённости производственных цехов качеством поставляемых комплектующих на **20%**.

Созданный алгоритм проверки качества на этапе приёмки обеспечивает оперативное выявление несоответствий и минимизацию рисков для производственного процесса.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.
2. Адлер Ю.П., Липкина В.В. Статистическое управление процессами. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2020,
3. Фейгенбаум А.В. Контроль качества продукции. – М.: Экономика, 2019.
4. Харрингтон Дж. Управление качеством в американских корпорациях. – М.: Прогресс, 2018.
5. Шонбергер Р. Японские методы управления производством. – М.: Экономика, 2017.
6. Кане М.М., Иванов Б.В., Корешков В.Н., Схиртладзе А.Г. Системы, методы и инструменты менеджмента качества. – СПб.: Питер, 2021.
7. Управление качеством: учебник / под ред. С.Д. Ильенковой. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2020,
8. Портер М.Э. Конкурентное преимущество: как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость. – М.: Альпина Паблишер, 2016.
9. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. – М.: Альпина Паблишер, 2019.
1. ГОСТ Р 5468-2011. Управление проектами. Требования к управлению проектом.
10. Качалов В.А. Управление качеством: учебное пособие. – М.: Форум, 2019.
11. Мазур И.И., Шапиро В.Д., Ольдерогге Н.Г. Управление проектами. – М.: Омега-Л, 2020,
12. Томпсон А.А., Стрикленд А.Дж. Стратегический менеджмент: концепции и ситуации для анализа. – М.: Вильямс, 2018.
13. ГОСТ Р ИСО 14001-2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению.
14. Кане М.М., Иванов Б.В., Схиртладзе А.Г., Корешков В.Н., Сергеев С.А., Чекмарев А.Н., Шемякина Т.Ю., Щипанов В.В., Яшин Б.Л. Менеджмент организации на основе стандартов серии ISO 9000:2015: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2022.

Есембаев М.Т.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
marat.esembaev@dipoautomotive.com
Парфеньева И.Е.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
iparfeneva@mail.ru

РЕВЕРСИВНЫЙ АНАЛИЗ ВИДОВ И ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКАЗОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ

Аннотация. В статье рассматривается реверсивный анализ (R-FMEA) как инструмент для постоянного обновления и совершенствования существующего FMEA в условиях реального производства топливных систем автомобилей.

Ключевые слова: анализ видов и последствий отказов (FMEA), реверсивный анализ (R-FMEA), стандарт AIAG VDA FMEA, управление рисками, оценка рисков, производство топливных систем для автомобилей.

Esembaev M.T.
Student
Moscow Polytechnic University,
Russia, Moscow
marat.esembaev@dipoautomotive.com
Parfenyeva I.E.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification,
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
iparfeneva@mail.ru

REVERSE ANALYSIS OF TYPES AND CONSEQUENCES OF FAILURES IN THE MANUFACTURE OF FUEL SYSTEMS FOR CARS

Abstact. The article discusses reverse analysis (R-FMEA) as a tool for continuous updating and improvement of the existing FMEA in the conditions of real production of fuel systems of cars.

Keywords: analysis of types and consequences of failures (FMEA), reverse analysis (R-FMEA), AIAG VDA FMEA Standard, risk management, risk assessment, production of fuel systems for cars.

В современных условиях глобализации производства и ужесточения требований к качеству продукции передовые промышленные предприятия все чаще внедряют международные стандарты управления рисками. Одним из ключевых инструментов в этой области является методология FMEA, которая позволяет системно выявлять, анализировать и минимизировать потенциальные риски на этапах проектирования и производства.

Общество с ограниченной ответственностью «ДСК Пластик Омниум Инержи» (далее – ООО «ДИПО») – совместное предприятие между компаниями «Пластик Омниум Ауто Инержи» и ООО «Детальстройконструкция». Продукцией ООО «ДИПО» являются пластиковые топливные системы автомобилей (топливные баки) для крупнейших автомобильных концернов, собирающих свои автомобили в России. На данный момент у ООО «ДИПО» имеются три производственные площадки: в г. Тольятти (на территории ООО «ДСК»), пгт. Ставрово (Владимирская область) и г. Санкт-Петербург. В данный момент ООО «ДИПО» является лидирующим поставщиком топливных систем для автомобилестроения в России с нулевым показателем PPM брака у потребителя.

В своей деятельности предприятие руководствуется стандартом AIAG VDA FMEA. Данная методология представляет собой результат совместной работы Automotive Industry Action Group (AIAG)[1] и немецкой ассоциации Verband der Automobilindustrie (VDA)[2,] что обеспечивает ее соответствие как международным, так и европейским требованиям. По состоянию на 2024 год стандарт AIAG VDA FMEA принят компаниями GM, Ford, Stellantis, Honda NA, BMW, Volkswagen Group, Mercedes-Benz Group AG (ранее Daimler AG) и Daimler Truck.

Современное руководство AIAG VDA FMEA представляет собой не модификацию предыдущих версий стандартов, а принципиально новый документ, разработанный в результате сотрудничества ведущих автопроизводителей, поставщиков компонентов, а также экспертов AIAG и VDA. Данный документ призван заменить ранее действовавшие руководства: AIAG FMEA (4-е издание) и VDA FMEA (том 4).

Несмотря на то, что в новом руководстве сохранены некоторые традиционные элементы, в него внесен ряд существенных изменений:

- смещение акцента с выявления дефектов на их предотвращение;
- структуризация процесса в виде семи последовательных этапов, что позволяет систематизировать применение инструментов обеспечения надежности;
- замена показателя RPN (Risk Priority Number) на систему AP (Action Priority), основанную на использовании специальных таблиц для определения приоритетности корректирующих мероприятий;
- введение дополнительного метода FMEA-MSR (Monitoring and System Response), направленного на анализ возможностей системы по диагностике, обнаружению и устранению неисправностей в процессе эксплуатации.

[1] AIAG (Automotive Industry Action Group) – группа действий автомобильной промышленности, международная ассоциация, основанная в 1982 г. и базирующаяся в г. Саутфилд (штат Мичиган, США).

[2] VDA (Verband der Automobielindustie) – Союз автомобильной промышленности Германии, объединяет немецких производителей и поставщиков различного уровня. В 1997 году в рамках VDA создан Центр менеджмента качества QMC (Qualitäts Management Center), который занимается в том числе и разработкой стандартов VDA, направленных на улучшение и развитие систем менеджмента качества (СМК) с целью повышения качества и надежности автотранспортных средств.

Уровень риска, ранее оцениваемый как приоритетное число риска (RPN) и предполагающий идентификацию потенциальных отказов, их причин и последствий с последующей оценкой по трем ключевым параметрам (Severity (S) – степень тяжести последствий отказа; Occurrence (O) – вероятность возникновения отказа; Detection (D) – возможность обнаружения отказа до его возникновения), в новом документе предлагается оценивать как приоритет действий (AP – Action Priority). AP может принимать три значения и классифицируется с помощью интуитивно понятных символов (L (Low) – низкий приоритет действий; M (Medium) – средний приоритет; H (High) – высокий приоритет).

Соответствующая таблица приоритета действий AP (рисунок 1) позволяет наглядно определить уровень критичности каждого риска и оптимизировать процесс управления качеством.

		Occurrence						
		1	2-3	4-5	6-7	8-10		
Severity	1	L	L	L	L	L	1	Detection
		L	L	L	L	L	2-4	
		L	L	L	L	L	5-6	
		L	L	L	L	L	7-10	
	2-3	L	L	L	L	L	1	
		L	L	L	L	L	2-4	
		L	L	L	L	M	5-6	
		L	L	L	L	M	7-10	
	4-6	L	L	L	L	M	1	
		L	L	L	M	M	2-4	
		L	L	L	M	H	5-6	
		L	L	M	M	H	7-10	
	7-8	L	L	M	M	H	1	
		L	L	M	H	H	2-4	
		L	M	M	H	H	5-6	
		L	M	H	H	H	7-10	
	9-10	L	L	M	H	H	1	
		L	L	H	H	H	2-4	
		L	M	H	H	H	5-6	
		L	H	H	H	H	7-10	

Рис. 1. Таблица приоритета действий AP

Преимущества, связанные с внедрением новой методологии AIAG VDA FMEA, очевидны – повышение качества продукции; снижение производственных рисков; обеспечение соответствия международным стандартам; укрепление конкурентных позиций на глобальном рынке.

В рамках повышения надежности производства топливных систем особое внимание уделяется анализу существующего Process FMEA (PFMEA) для сборочной станции наливных труб.

Производственный процесс, включающий сборку наливных труб, требует тщательного контроля на каждом этапе, особенно при монтаже критически важных компонентов, таких как уплотнительное кольцо, наливная чаша и заземляющая шина. Нарушения в этих операциях могут привести к серьезным последствиям, включая утечки топлива, коррозию или даже возгорание.

Таким образом, переход на современные стандарты FMEA представляет собой стратегически важное решение, способствующее технологическому развитию предприятия и повышению надежности выпускаемой продукции.

Возникновение методологии R-FMEA стало закономерным следствием выявленных недостатков традиционного PFMEA. Ключевой проблемой, стимулировавшей разработку нового подхода, стала практика преждевременного проведения PFMEA на этапе незавершенного проектирования оснастки. Как показали исследования, выполнение анализа до фиксации окончательных параметров инструмента и характеристик производимого продукта приводит к существенным погрешностям в идентификации режимов отказов. Расхождения между проектными и реальными эксплуатационными условиями создают системные ошибки в планах управления процессами, что проявляется в некорректном определении превентивных мер и средств обнаружения дефектов.

Данный недостаток традиционной методологии особенно критичен в условиях динамичного изменения производственных требований. R-FMEA, предложенная компанией Ford, вводит принцип двухэтапной верификации: первичный анализ на площадке производителя оснастки и финальная проверка после установки оборудования у заказчика. Такой подход позволяет минимизировать «слепые зоны» за счет итеративного уточнения параметров системы.

Разработка и применение метода реверсивного анализа видов и последствий отказов (R-FMEA) позволит повысить надежность и качество производства топливных систем автомобилей, а также минимизировать риски возникновения отказов.

Актуальность рассматриваемой темы обусловлена тем, что реверсивный анализ позволяет поддерживать FMEA-анализ в актуальном состоянии, оперативно реагируя на изменения в производственном процессе.

Это особенно важно в условиях ужесточения требований к качеству выпускаемой продукции и необходимости обеспечения стабильности производственных операций.

Целью исследования является повышение надежности производства топливных систем автомобилей за счет выявления потенциальных дефектов, которые могли быть упущены в классическом FMEA-анализе, и разработка мер по их предотвращению. В работе использованы данные из операционных инструкций (например, STAI-MFG-0004 V05N01), статистика производственных отказов за 2023-2024 гг. и наблюдения за реальным процессом изготовления топливных систем.

Реверсивный или обратный FMEA – это подход к применению проверенных процессов управления рисками и смягчения последствий FMEA в режиме «наоборот». R-FMEA предлагают подход к поиску новых видов отказов, причин и областей улучшения, которые были упущены в процессе FMEA.

R-FMEA – это метод, позволяющий попытаться выявить отсутствующие способы отказа или неадекватные средства предотвращения и обнаружения. Для достижения этой цели может быть много подходов, включая попытки изготовить дефектные детали, попытки обойти средства предотвращения или обнаружения или любые другие способы выявления потенциальных проблем. По сути, цель состоит в том, чтобы «сломать» процесс и найти сбои, которые не были учтены в PFMEA. Это упреждающий метод, направленный на выявление причины дефектов или проблем с качеством до того, как они возникнут.

В настоящее время не существует конкретного стандарта, связанного с обратным FMEA. Это обеспечивает максимальную гибкость при проектировании процесса R-FMEA, поскольку производитель лучше всех знает свои продукты и процессы. Такая гибкость позволяет разработать процесс R-FMEA для эффективного удовлетворения потребностей. Таким образом, также крайне важно, чтобы выбранный производителем инструмент был гибким и мощным.

Ключевая идея R-FMEA (Reverse Failure Mode and Effects Analysis) состоит в идентификации новых видов отказов, возникающих в ходе реального производственного цикла на предприятии. Полученные данные используются для актуализации существующего FMEA-анализа технологического процесса и сопутствующей документации.

Алгоритм выполнения обратного FMEA включает следующие этапы:

1) Выбор объекта анализа – определение конкретного участка для исследования (рабочее место, производственная линия, оборудование).

2) Создание рабочей группы – подбор специалистов, ответственных за проведение анализа.

3) Анализ текущего технологического процесса и FMEA-документации – изучение действующей схемы производства и ранее выявленных потенциальных отказов.

4) Выявление новых потенциальных дефектов – обнаружение ранее неучтенных сбоев и их причин.

5) Корректировка FMEA-анализа – внесение изменений в существующую матрицу рисков с учетом новых данных.

6) Фиксация результатов – оформление обновленной документации.

7) Актуализация вспомогательных материалов – приведение в соответствие сопутствующих регламентов и инструкций.

8) Распространение информации – обучение персонала и передача скорректированных данных заинтересованным подразделениям.

В данной работе подробно рассмотрен процесс сборки наливных труб, включая применяемое оборудование, последовательность операций и методы контроля качества. Особое внимание уделяется анализу потенциальных рисков с использованием методологии PFMEA, что позволяет выявить

критические точки процесса и разработать меры по их устранению. Результаты анализа помогут оптимизировать технологию сборки, минимизировать вероятность брака и повысить общую надежность производства.

Исследование базируется на данных производственного процесса, включая рабочие инструкции, спецификации оборудования и отчеты о выявленных несоответствиях, что позволило не только описать текущее состояние процесса, но и предложить пути его совершенствования на основе современных методов управления качеством.

Сборка наливной трубы является критически важным этапом производства топливной системы, требующим высокой точности и соблюдения технологических параметров.

Анализ PFMEA процесса сборки наливных труб требует комплексного подхода к оценке потенциальных рисков на каждом этапе производственного процесса. Учитывая специфику данного компонента топливной системы, особое внимание следует уделить критическим операциям, где вероятность возникновения дефектов максимальна.

Анализ режимов сбоя по этапам производственного процесса приведен на рисунке 2.

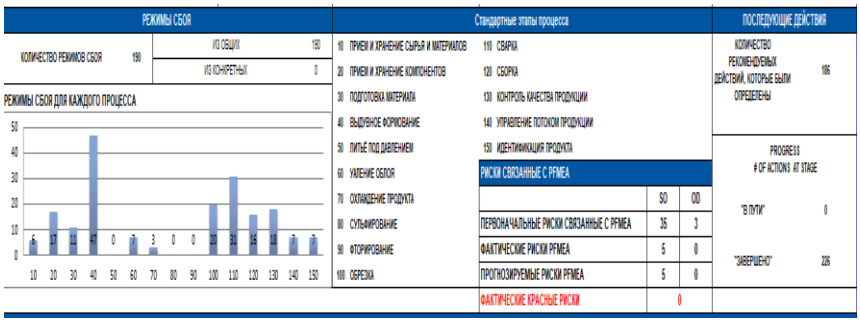


Рис. 2. Анализ режимов сбоя по этапам производственного процесса

Как следует из приведенных на рисунке 1 данных, самый большой процент сбоев фиксируется на операции 40 – выдувное формование и операции 120 – сборка.

Количество прогнозируемых последствий и приоритет действий (AP) в зависимости от этапа процесса приведен на рисунке 3.

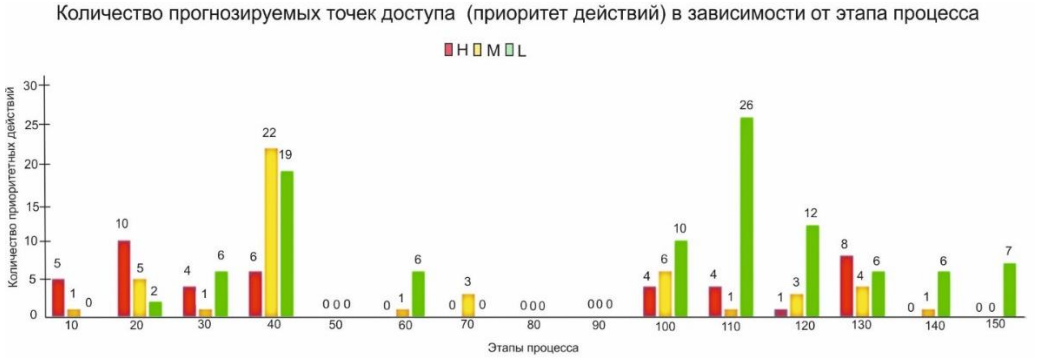


Рис. 3. Количество прогнозируемых последствий и приоритет действий (AP) в зависимости от этапа процесса

Далее был проведен PFMEA применительно к процессу сборки наливных труб. При анализе процесса сборки наливных труб следует учитывать потенциальные риски, связанные с качеством материалов и комплектующих; точностью сборки компонентов; герметичностью соединений; соответствием геометрических параметров; работоспособностью запорных механизмов.

На этапе сборки наиболее критичными оказались ситуации, связанные с неправильной установкой уплотнительных элементов и использованием неверных версий компонентов.

Серьезные проблемы также возникают при неправильной ориентации направляющих и отсутствии необходимых компонентов. В первом случае основной причиной является человеческий фактор и ошибки операторов при установке, что приводит к нарушению процесса заправки и потере функциональности системы. Во втором случае проблемы связаны с ошибками в планировании производства и складской логистикой, что влечет за собой простой оборудования и снижение производительности.

Анализ показывает, что для снижения критических рисков необходимо внедрить комплексные меры контроля. Прежде всего, следует установить системы автоматической проверки версий компонентов и датчики контроля правильности установки уплотнений. Важным элементом является разработка четких визуальных инструкций с фотографиями, которые помогут операторам избежать ошибок при сборке.

Для устранения высоких рисков рекомендуется внедрить систему штрих кодирования компонентов и установить датчики контроля ориентации. Регулярное обучение персонала и внедрение системы предупреждения о недостающих компонентах также помогут минимизировать вероятность возникновения проблем.

Текущие меры контроля включают как предотвращающие, так и обнаруживающие действия. Предотвращающие меры охватывают рабочие инструкции с подробными описаниями, обучение операторов, визуальный контроль и использование автоматических датчиков. Обнаруживающие меры включают визуальный осмотр, тестирование герметичности, контроль размеров и проверку функциональности.

Для дальнейшего улучшения процессов рекомендуется автоматизировать контроль правильности установки компонентов и внедрить системы автоматической идентификации. Разработка системы предупреждения о критических ошибках и создание подробных визуальных руководств помогут повысить качество сборки.

Особое внимание следует уделить сезонным факторам, влияющим на работу с уплотнителями, и эргономике рабочего места. Необходимо регулярно проверять эластичность материалов в различных температурных условиях и оптимизировать расположение компонентов для удобного доступа при сборке.

Квалификация персонала играет ключевую роль в снижении рисков. Регулярное повышение квалификации, проведение практических тренингов и тестирование знаний и навыков операторов помогут минимизировать вероятность ошибок.

Следует отметить, что комплексный подход к улучшению производственных процессов, включающий автоматизацию, совершенствование документации и повышение квалификации персонала, позволит значительно снизить риски и повысить качество сборки линии труб RF90, Особое внимание при этом следует уделить улучшению возможностей обнаружения потенциальных проблем на ранних этапах производства.

На основании собранных данных о реальных отказах на станции сборки наливных труб был проведен реверсивный FMEA-анализ (R-FMEA). Этот метод позволил выявить неучтенные в классическом FMEA виды отказов, такие как дефекты крепления чаши, ненадежное соединение заземляющей шины, повреждение уплотнительного кольца или неправильная установка хомута.

Для проведения R-FMEA была создана команда. Состав команды представлен в таблице на рисунке 4. Совместная работа команды обеспечивает детальный разбор каждого этапа сборки, оценку причин возникновения дефектов и разработку корректирующих мер.

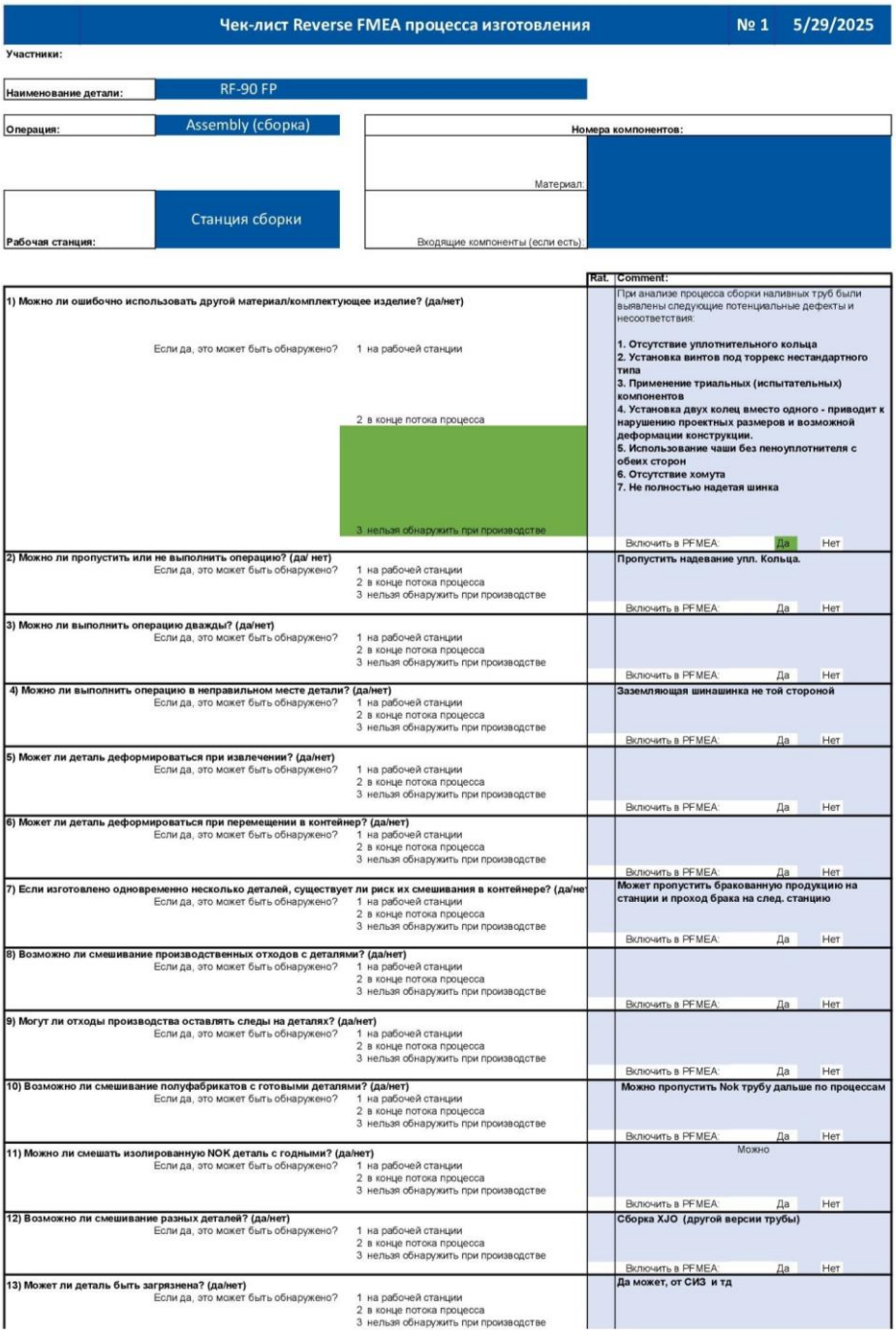
Команды | Обратный FMEA

[НОМЕР ДОКУМЕНТА]/[ВЕРСИЯ]

ООО "ДИПО" Локальная команда R FMEA						
Имя	Должность	Площадка	Номер телефона	Почта	Обязанности	Присутствие
Есембаев Марат Тимурович	Инженер по качеству	Ставрово		marat.esembaev@dipoautomotive.com		Д
Капустин Артем Вячеславович	Руководитель по запуску новых проектов	Ставрово		artem.kapustin@dipoautomotive.com		Д
Фатеев Валерий Сергеевич	Ведущий инженер-технолог	Ставрово		valeriy.fateev@dipoautomotive.com		Д
Рослов Александр Евгеньевич	Младший специалист службы ремонта и наладки	Ставрово		alexander.roslov@dipoautomotive.com		Д
Смирнов Валерий Александрович	Инженер -технолог	Ставрово		valeriy.smirnov@dipoatomotive.com		Д
Клокова Татьяна Алеексеевна	Руководитель службы качества	Ставрово		tatyana.klokova@dipoautomotive.com		Д
Афонина Калина Сергеевна	Младший технолог	Ставрово				Д

Рис. 4. Состав команды R-FMEA

Результаты R-FMEA анализа представлены на рисунке 5.



Чек-лист Reverse FMEA процесса изготовления	№ 1	5/29/2025

Участники:

Наименование детали:	RF-90 FP
Операция:	Assembly (сборка)
Рабочая станция:	Станция сборки

Номера компонентов:

Материал:

Входящие компоненты (если есть):

	Rat.	Comment:
1) Можно ли ошибочно использовать другой материал/комплектующее изделие? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		При анализе процесса сборки наливных труб были выявлены следующие потенциальные дефекты и несоответствия: **1. Отсутствие уплотнительного кольца** **2. Установка винтов под торрекс нестандартного типа** **3. Применение триальных (испытательных) компонентов** **4. Установка двух колец вместо одного - приводит к нарушению проектных размеров и возможной деформации конструкции.** **5. Использование чаши без пеноуплотнителя с обеих сторон** **6. Отсутствие хомута** **7. Не полностью надетая шинка** Включить в PFMEA: Да Нет
2) Можно ли пропустить или не выполнить операцию? (да/ нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		**Пропустить надевание упл. Кольца.** Включить в PFMEA: Да Нет
3) Можно ли выполнить операцию дважды? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		Включить в PFMEA: Да Нет
4) Можно ли выполнить операцию в неправильном месте детали? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		**Заземляющая шинашинка не той стороной** Включить в PFMEA: Да Нет
5) Может ли деталь деформироваться при извлечении? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		Включить в PFMEA: Да Нет
6) Может ли деталь деформироваться при перемещении в контейнер? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		Включить в PFMEA: Да Нет
7) Если изготовлено одновременно несколько деталей, существует ли риск их смешивания в контейнере? (да/нет Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		**Может пропустить бракованную продукцию на станции и проход брака на след. станцию** Включить в PFMEA: Да Нет
8) Возможно ли смешивание производственных отходов с деталями? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		Включить в PFMEA: Да Нет
9) Могут ли отходы производства оставлять следы на деталях? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		Включить в PFMEA: Да Нет
10) Возможно ли смешивание полуфабрикатов с готовыми деталями? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		**Можно пропустить Nok трубу дальше по процессам** Включить в PFMEA: Да Нет
11) Можно ли смешать изолированную NOK деталь с годными? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		Можно Включить в PFMEA: Да Нет
12) Возможно ли смешивание разных деталей? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		**Сборка XJO (другой версии трубы)** Включить в PFMEA: Да Нет
13) Может ли деталь быть загрязнена? (да/нет) Если да, это может быть обнаружено? 1 на рабочей станции 2 в конце потока процесса 3 нельзя обнаружить при производстве		**Да может, от СИЗ и тд**

Рис. 5. Пример заполненного чек-листа по результатам R-FMEA

Результаты анализа позволяют не только усовершенствовать технологический процесс, но и минимизировать риски возникновения критических отказов, что соответствует стратегии предприятия в области качества и безопасности продукции.

Документ (заполненный чек-лист по результатам R-FMEA) представляет собой подробный анализ процесса сборки детали RF-90 FP, включающий:

- детальный разбор возможных ошибок на всех этапах сборки;
- оценку возможности обнаружения дефектов;
- предложения по включению в PFMEA.

В результате проведенного исследования реверсивного анализа видов и последствий отказов (R-FMEA) сформировалось комплексное понимание данного метода как инструмента совершенствования производственных процессов.

Инновационность подхода заключается в его практической направленности и возможности выявления скрытых рисков, которые не были учтены при первоначальном проектировании процессов. Метод позволяет не только обнаруживать потенциальные проблемы, но и тестировать производственную систему на устойчивость к различным видам отклонений.

Практическая ценность R-FMEA проявляется в систематическом обновлении производственных процессов и накоплении ценного опыта. Методика становится эффективным инструментом развития предприятия, способствуя снижению количества дефектов и оптимизации затрат на их устранение.

Ключевым преимуществом данного подхода является его универсальность – возможность применения на всех этапах производства, от начала серийного выпуска до завершения жизненного цикла продукции. При этом частота использования метода определяется конкретными потребностями и уровнем зрелости производственной системы.

Успешная реализация R-FMEA требует создания определенной организационной культуры, основанной на принципах непрерывного улучшения. Важную роль играет систематическое обучение персонала и внедрение корректирующих мероприятий на основе выявленных несоответствий.

Результативность метода подтверждается его способностью создавать надежную систему управления качеством. Это достигается за счет постоянного совершенствования процессов и их адаптации к реальным условиям производства, что в конечном итоге приводит к повышению эффективности всей производственной системы.

Таким образом, реверсивный анализ видов и последствий отказов представляет собой современный инструмент управления качеством, позволяющий предприятиям достигать высоких показателей надежности и эффективности производства через постоянное совершенствование своих процессов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 27.303-2021 «Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов» https://docs.cntd.ru/document/1200180916

2. ГОСТ Р 58139-2018 «Система менеджмента качества. Требования к организациям автомобильной промышленности» https://docs.cntd.ru/document/1200159419

3. AIAG VDA FMEA Handbook 2024. Руководство по анализу видов и последствий отказов [Текст]. – Southfield, MI: AIAG; Frankfurt: VDA, 2024. – 380 с.

4. IATF 16949:2016 «Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ISO 9001:2015 для организаций, занятых в серийном производстве и производстве запасных частей в автомобильной промышленности» [Текст]. – IATF, 2016. – 284 с.

Мамаев В.А.
ведущий инженер-математик отдела надежности
АО «ГосНИИП»
Россия, Москва
vova_kirov@mail.ru

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ И НАДЕЖНОСТЬЮ ИЗДЕЛИЙ ОДНОКРАТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ: ВЫПОЛНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ И КОНТРОЛЬ СООТВЕТСТВИЯ

Аннотация. Изделия однократного применения – это приборы, устройства или их составные части, которые используются по назначению только один раз, разрушаясь во время или после работы по назначению. Настоящая статья рассматривает вопросы качества и надежности изделий однократного применения с использованием концепции системного подхода. Проанализировано использование элементов системного подхода в управлении качеством в научной литературе. Рассмотрено развитие данной концепции от её появления до современности. Разобраны принципы системного подхода в контексте изделий однократного применения. Приведены особенности проблематики оценки надежности для мелкосерийных высоконадежных дорогостоящих изделий однократного применения. Проанализирована специфика времени хранения и времени применения таких изделий. Показано, что в ряде случаев испытания на надежность отдельных составных частей становятся настолько объемны, что для их показательности требуются неприемлемо большие количества образцов. Обоснована необходимость применения специального математического аппарата для получения достоверных оценок. Показана необходимость сбора информации о надежности элементов и систем на полном жизненном цикле изделия. Рассмотрена необходимость контроля качества поставщиков, производственной и технологической системы предприятия. Сделан вывод об актуальности развития расчётно-экспериментальных методов оценок надежности изделий. Показано одно из дальнейших направлений развития – систематизация неопределенностей.

Ключевые слова: качество, надёжность, изделие однократного применения, системный подход, расчетно-экспериментальный метод оценки.

Mamaev V.A.
Leading mathematician-engineer of the reliability department
JSC «GosNIIP»
Russia, Moscow
vova_kirov@mail.ru

A SYSTEMATIC APPROACH TO MANAGING THE QUALITY AND RELIABILITY OF ONE-SHOT DEVICE: IMPLEMENTATION OF REQUIREMENTS AND CONFORMITY MONITORING

Abstact. One-shot systems are devices, units, or their components that are used only once for their intended purpose and deteriorate during or after their intended use. This article examines the quality and reliability of one-shot systems using a systems approach. The article analyzes the use of systems approach elements in quality management in the scientific literature. The development of this concept from its inception to the present day is considered. The principles of a systems approach in the context of one-shot systems are discussed. The article presents the specific features of reliability assessment for small-scale, highly reliable, expensive, one-shot systems. The specifics of storage time and use time for such products are analyzed. It is shown

that in some cases, reliability testing of individual components becomes so extensive that an unacceptably large number of samples is required to achieve representative results. The article substantiates the need to apply specialized mathematical apparatus to obtain reliable assessments. It demonstrates the need to collect information on the reliability of components and systems throughout the entire product life cycle. The need for quality control of suppliers, as well as the enterprise's production and technological systems, is considered. A conclusion is reached regarding the relevance of developing calculated-experimental method assessments of product reliability. One of the further directions of development, systematization of uncertainties is shown.

Keywords: quality, reliability, one-shot systems, systems approach, calculated-experimental method.

Почти сто лет назад Л. Берталанфи сформулировал общую теорию систем. Развитие данной концепции привело к понятиям «системный анализ», «системное исследование», «системное движение», «системотехника», «системный подход.

Системный подход – это методология, в основе которой лежит рассмотрение объектов и явлений как компонентов более крупных систем, т.е. как целостных множеств взаимосвязанных элементов. Такая концепция позволяет более детально представить сложное устройство, создать его цифровой двойник, найти закономерности, которые не всегда могут быть выделены при дискретном рассмотрении элементов.

Одной из основных причин появления системного подхода является исчерпание возможностей механистической концепции для объяснения научной картины мира в первой половины 20 века. Стало очевидно, что целое – это не только сумма своих частей, но что-то большее. Другой причиной стало нахождение схожих закономерностей в разных научных областях. Например, в электрических и механических системах или в химии и социологии. Схема из резистора, индуктивности и конденсатора аналогична схеме из груза, пружины и амортизатора и описывается тем же самым дифференциальным уравнением. В-третьих, появление современной (на период второй половины XX века) техники, развитие теории автоматического регулирования, теории межотраслевого и межрегионального анализа, планирование транспортных потоков привело к необходимости комплексного (системного) подхода для решения возникающих проблем [1].

«Системный подход можно рассматривать как принцип деятельности, обеспечивающий ее правильность, движение в заданном направлении, но не гарантирующий однозначность и успех» [2, с. 33].

В отличие от редукционизма (разделения общего на части для изучения), системный подход предполагает акцент на отношениях между компонентами и эмерджентных свойствах – характеристиках, возникающих только при объединении элементов. «Системные проблемы требуют и системных заключений, т.е. мы стремимся найти такие решения проблем более крупных систем, которые не только удовлетворяют целям подсистем, но

и обеспечивают сохранение задач и функций деятельности глобальной системы в целом» [3, с. 3710].

Доктрина активно развивалась в середине XX века благодаря работам зарубежных авторов Людвига фон Берталанфи, Норберта Винера, Герберта Саймона, Эдварда Деминга, а также советских ученых Вадима Садовского, Эдуарда Юдина, Игоря Блауберга и многих других.

В современных исследованиях в области управления качеством системному подходу также уделяется значительное внимание. В работе [4] показана связь между отказами на этапах жизненного цикла «эксплуатация» и «производство». В статье [5] предложена идеология проектирования автоматизированной информационной системы о качестве и надёжности изделий в вертикально-интегрированной структуре с реализацией автоматизированной обработки значительных объёмов разнородной статистической информации. В работе [6, с. 17] рассмотрены «технические, экономические, организационные и иные виды мероприятий, позволяющие повышать качество продукта на каждом этапе его создания». Исследование [7] показывает интегрирующую роль системного подхода к управлению качеством в организации. В работе [8] описаны причинно-следственные связи обеспечения качества бизнес-процессов компании под влиянием эндогенных и экзогенных факторов в условиях высокотехнологичного рынка. В исследовании [9] на примере фармацевтической компании рассматривается подход к управлению качеством в широком контексте производства и операций, освещаются стратегии, концепции и методы, которые используются для обеспечения качества своей продукции. В статье [10] поднимаются вопросы обеспечения и поддержания высокой надежности на протяжении всего жизненного цикла технической системы в машиностроительной отрасли, то есть определения требований, проектирования, исследований, разработок, производства, монтажа, эксплуатации и утилизации продукции.

Настоящая работа показывает специфику применения системного подхода для управления качеством изделий однократного применения. В иностранной науке используется соответствующее понятие «one-shot device», иногда «one-shot system». Это могут быть космические корабли, ракеты или их составные части.

Такие изделия обладают следующими особенностями: высокая надежность (вероятность безотказной работы порядка 0,99–0,999) и низкий объём производства (10–100 штук в год), что приводит к крайне малой выборке отказов и, соответственно, требует [11, 12] специального математического аппарата для оценки надежности.

В работе [3] в рамках философии системного подхода выделены следующие принципы: «элементаризм», «всеобщая связь», «развитие», «целостность» и «системность», «оптимальность» и «целеполагание», «иерархия», «формализация» и «нормативность». Далее рассматривается их специфика для обеспечения требуемого уровня качества и надежности изделий однократного применения.

Элементаризм означает, что каждое изделие рассматривается как композиция элементов. Как правило у изделий однократного применения можно выделить блок управления, систему навигации, один или несколько двигателей, блок рулевых приводов, антенны. Данные составные части изготавливаются разными изготовителями с разной культурой производства. Периодически, под влиянием стохастических факторов, надежность отдельного элемента может ухудшаться, и для предотвращения попадания дефектного комплектующего в производство необходимо в режиме реального времени контролировать качество поставщиков. Для высоконадежных изделий однократного применения, использование качественных сборочных единиц выступает ключевым фактором для соответствия техническим требованиям. Джуран ещё пол века назад показывал, что потери от некондиционных комплектующих составляют от 20 до 40% производственных убытков. Более современные данные от таких организаций как McKinsey & Company, Deloitte, ASCM, ASQ также подтверждают эту цифру [13, 14].

Всеобщая связь подразумевает, что определенные выше элементы связаны друг с другом и создают единую систему. Блок управления получает информацию от датчиков и выдает сигнал для рулевых приводов. Связь может быть 1:1, 1:N, M:1 или M:N, но каждый элемент обязательно должен быть соединен хотя бы с одним другим. Поэтому не существует отдельных элементов, надежность которых менее важна. Точно также важно контролировать всю производственную и технологическую систему предприятия. Изделия однократного применения обычно не предусматривают резервирования и отказ одного элемента означает отказ всей системы. Некачественная смазка одной сборочной единицы от одного поставщика, истекший срок годности клея, неповеренное вовремя средство измерения, любая ошибка может привести к отказу финального изделия.

Развитие означает, что системы проходят через несколько этапов жизненного цикла. Опытно-конструкторская работа (ОКР), приёмочные испытания, постановка на производство, квалификационные испытания, серийное производство, хранение, применение по назначению. Спецификой изделий однократного применения является большое время хранения – годы и даже десятилетия и малое время работы – от нескольких секунд до нескольких часов. Другой особенностью является то, что как правило при завершении ОКР невозможно экспериментально подтвердить требуемые показатели надежности из-за малого числа выпускаемых изделий и нулевого количества отказов при испытаниях, что делает процесс оценки надежности достаточно нетривиальным. Возможным выходом здесь является использование расчётно-экспериментальных методов, основанных на сборе всей статистической информации об отказах и наработках изделий. Первоначально подтверждается начальный уровень надежности, далее оценка дополняется по результатам всех видов испытаний. Для этого необходимо организовать сбор информации о надежности элементов и систем на полном жизненном цикле изделия.

Целостность и системность означает, что взаимодействие элементов друг с другом сильней, чем с элементами внешней среды. Изделие не должно разрушаться при сильной вибрации или при повышенной температуре. Целостность позволяет рассмотреть эмерджентные свойства и ввести понимание принципов обратной связи. В контексте управления качеством можно привести пример возникновения высокочастотной помехи (наводки) от одного элемента к другому или резонанс чувствительного элемента в датчике из-за вытекания демпфирующей жидкости.

Оптимальность и целеполагание предполагает возможность достижения наилучших результатов (целей) или максимальной эффективности в рамках заданных условий и ограничений. Для изделий однократного применения актуальным является достижение максимальной вероятности безотказной работы при монополизме поставщиков, соблюдении ограничительных перечней, выполнении требований по массе и габаритам. Как правило существует несколько критериев оптимума и для их достижения требуется решать задачи многоцелевого программирования. Цели при этом должны быть четко сформулированы и измеримы. При необходимости они могут быть разбиты на подцели, которые помогают более эффективно достигать общую цель. Обязательно следует учитывать внешние и внутренние факторы, которые могут повлиять на достижение целей.

Иерархия позволяет разделить изделие однократного применения на уровни как по структуре, так и по функционалу. Основное изделие делится на составные части, каждая из них на элементы, последние в свою очередь, состоят из электрорадиоизделий. Функционально можно выделить блок получения информации, блок обработки данных, блок исполнительных механизмов.

Формализация означает, что изделие можно представить в виде строгих математических и логических моделей, которые описывают взаимодействие элементов. Для оценки качества и надежности как правило используются элементы теории вероятности и математической статистики, реже линейная алгебра или дифференциальные уравнения. Активно применяются методы Монте-Карло для симуляции процессов, т.к. высокая стоимость изделий не позволяет провести требуемое число натурных испытаний.

Нормативность устанавливает эталон (норму) работы системы. Это функционирование, которое считается приемлемым или ожидаемым в рамках определенной системы. Нормы могут варьироваться в зависимости от контекста и изменяться со временем.

В ходе исследования показано, что изделия однократного применения имеют свою специфику, что приводит к определенным особенностям при контроле их соответствия требованиям качества и надежности. Как правило стоимость таких изделий не позволяет провести требуемое количество циклов испытаний. Кроме того, значительная часть изделий однократного применения состоит их нескольких составных частей и может быть испытана только в составе основного объекта.

По мнению автора, в связи с постоянным увеличением требований к показателям надежности при разработке и модернизации изделий, будет повышаться актуальность использования расчётно-экспериментальных методов оценки.

Результаты работы могут быть использованы при конструировании и испытаниях высоконадежных изделий однократного применения.

Дальнейшее направление исследований – систематизация неопределенностей при оценке качества и надежности изделий однократного применения.

Список литературы

1. Садовский Г.Н. Вступительная статья // Исследования по общей теории систем: Сборник переводов / Общ. ред. и вст. ст. В. Н. Садовского и Э. Г. Юдина. – М.: Прогресс, 1969.–С.23–82.
2. Беркут В. П. Системный подход и системный анализ как методологические средства научного исследования / В. П. Беркут, Е. А. Дубинина // Гуманитарный вестник Военной академии Ракетных войск стратегического назначения. – 2020, – № 3(20). – С. 28–41.
3. Арефьев И. Б. Элементы философии системного подхода / И. Б. Арефьев, О. В. Афанасьева // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов, Москва, 17–20 июня 2024 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. – С. 3710–3713.
5. Остапенко С. Н. Диагностирование дефектов ЭКБ на этапе жизненного цикла «эксплуатация» через дефекты на «производстве» / С. Н. Остапенко, О. Г. Рынкова // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Тула, 06–08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 237–241.
6. Афанасьев В. Б. Онтологическое проектирование автоматизированной информационной системы поддержки качества продукции предприятия / В. Б. Афанасьев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020, – № 10, – С. 12–22.
7. Алютина Д. С. Системный подход к управлению качеством продукции на предприятии / Д. С. Алютина, Н. В. Лаврухина // Kant. – 2021. – № 2(39). – С. 16–20, – DOI 10,24923/2222-243X.2021-39.3.
8. Гагарина С. Н. Управление качеством в организации: эволюция, системный подход / С. Н. Гагарина, И. А. Иргашев // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2023. – № 1–1(95). – С. 75–81. – DOI 10,24412/2411-0450-2023-1-1-75-81.
9. Rubin A. & Zinchenko N. & Artyushkova A.& Sorokozherdyev V. & Pimenov G. (2021). The systemic approach to managing the quality of company’s business processes. International Journal for Quality Research. 15. 487–506. 10,24874/IJQR15.02-08.
10. Sharma Sheetal & Poonam, & Singh, Ajit. (2025). A Systematic Approach on Quality and Production Operations Management of Biocon Limited's. International Journal of Commerce and Management 9. Research. 10, 2025.
11. Breznická A., Kohutiar M., Krbaťa M. et al. Reliability analysis during the life cycle of a technical system and the monitoring of reliability properties // Systems. – 2023. – Vol. 11. – P. 556. – DOI: https://doi.org/10,3390/systems11120556.
12. Воловик А.В. Исследование оценок параметров распределения по малой выборке // Надежность. 2025 №4. С. 29–35. https://doi.org/10,21683/1729-2646-2025-25-4-29-35.

13. Горюнов О.В., Кузьмина И.Б., К выбору методов оценки статистических параметров надежности элементов систем для использования в вероятностном анализе безопасности. // Надежность. 2025 №4. С. 17–28. https://doi.org/10,21683/1729-2646-2025-25-4-17-28.

14. Crandal, R. E., & Julien, O. (2010). Measuring the cost of quality. Industrial Management, 52, 14–18.

15. A. Murumkar, S. N. Teli, U. Bhushi, and A. Deshpande, “Hidden Cost of Quality: A Re-view,» in 11th ISDSI International Conference, At IIM, Trichy-Tamilnadu, India, 2017.

Федорова Н.Б.
к.т.н., доцент кафедры «Товарная экспертиза, технология торговли и ресторанный бизнес»
Краснодарский филиал РЭУ им. Г.В. Плеханова
Россия, Краснодар
Лобач Я.В.
студент
КФ РЭУ им. Плеханова
Россия, Краснодар
yana10,lobach20@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРТИЗЫ КАЧЕСТВА КОЖЕВЕННО-ОБУВНЫХ И ПУШНО-МЕХОВЫХ ТОВАРОВ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к экспертизе и оценке качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров в условиях цифровизации экономики. Актуальность темы обусловлена ростом объемов онлайн-торговли и увеличением требований потребителей к качеству продукции. Проанализированы традиционные методы экспертизы, включающие органолептические, физико-механические и лабораторные исследования, а также современные инновационные подходы, такие как цифровая диагностика материалов, использование искусственного интеллекта и автоматизированных систем контроля качества. Особое внимание уделено проблемам фальсификации продукции и необходимости повышения достоверности экспертизы. В рамках исследования рассмотрены ключевые показатели качества кожевенных и меховых изделий, а также методы их оценки. Результаты показывают, что интеграция цифровых технологий в процесс экспертизы позволяет повысить точность оценки, сократить время анализа и снизить влияние человеческого фактора. Сделан вывод о необходимости дальнейшего развития технологий контроля качества и внедрения комплексных систем экспертизы в товароведческой практике.

Ключевые слова: качество продукции, товароведение, экспертиза, кожевенные товары, меховые изделия, оценка качества, цифровизация, фальсификация.

Fedorova N.B.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Commodity Science, Trade Technology and Restaurant Business
Krasnodar Branch of Plekhanov Russian University of Economics
Russia, Krasnodar

Lobach Ya.V.
Student
Krasnodar Branch of Plekhanov Russian University of Economics
Russia, Krasnodar
_yana10,lobach20@mail.ru

MODERN METHODS OF QUALITY ASSESSMENT OF LEATHER, FOOTWEAR, AND FUR PRODUCTS IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION

Abstact. The article examines modern approaches to the assessment and evaluation of the quality of leather, footwear, and fur products in the context of economic digitalization. The relevance of the topic is обусловлена the growth of e-commerce and increasing consumer demands for product quality. Traditional methods of expertise, including organoleptic, physical-mechanical, and laboratory testing, are analyzed alongside innovative approaches such as digital material diagnostics, artificial intelligence, and automated quality control systems. Particular attention is paid to the problem of product falsification and the need to improve the reliability of expertise. The study considers key quality indicators of leather and fur products, as well as methods for their evaluation. The results show that the integration of digital technologies into the expertise process improves assessment accuracy, reduces analysis time, and minimizes the influence of the human factor. It is concluded that further development of quality control technologies and the implementation of integrated expertise systems are necessary in modern commodity science practice.

Keywords: product quality, commodity science, quality assessment, leather goods, fur products, digitalization, expertise, falsification.

В современных условиях развития рынка товаров легкой промышленности особое значение приобретает обеспечение высокого уровня качества продукции. Кожевенно-обувные и пушно-меховые товары занимают значительную долю рынка, при этом характеризуются высокой стоимостью и чувствительностью к качественным характеристикам.

Рост электронной коммерции и дистанционных продаж усиливает проблему достоверной оценки качества товаров, поскольку потребитель не имеет возможности непосредственного контакта с продукцией. Это повышает роль товароведческой экспертизы как инструмента подтверждения качества и выявления несоответствий.

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов экспертизы с учетом современных технологических возможностей. Целью работы является анализ традиционных и инновационных методов оценки качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров.

Методологическая основа исследования базируется на комплексном подходе к анализу качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров, который сочетает теоретические и практико-ориентированные методы. В ходе работы был проведён анализ научной и учебной литературы в области товароведения и экспертизы непродовольственных товаров, что позволило сформировать общее представление о существующих подходах к оценке качества продукции.

Особое внимание уделялось сравнительному анализу традиционных и современных методов экспертизы, применяемых в практике оценки кожевенных и меховых изделий. Это позволило выявить их преимущества, ограничения, а также определить перспективные направления развития. В процессе исследования также использовались методы обобщения и систематизации, направленные на структурирование ключевых показателей качества продукции и подходов к их оценке.

Традиционные методы экспертизы по-прежнему занимают важное место в товароведческой практике. Они включают органолептическую оценку, позволяющую определить внешний вид изделия, равномерность окраски, наличие дефектов поверхности, а также физико-механические испытания, направленные на оценку прочности, износостойкости и устойчивости материалов к деформациям. Дополнительно применяются лабораторные методы, позволяющие установить химический состав материалов, выявить наличие вредных веществ и оценить структуру сырья.

Вместе с тем, в условиях цифровизации экономики наблюдается активное внедрение современных технологий в процесс экспертизы. К ним относятся методы цифровой диагностики материалов, спектральный анализ, а также использование автоматизированных систем контроля качества. Особое значение приобретает применение технологий искусственного интеллекта, позволяющих распознавать дефекты поверхности и проводить более точную и объективную оценку состояния изделий.

Таким образом, используемая методология исследования носит комплексный характер и направлена на всесторонний анализ качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров с учётом как традиционных, так и инновационных подходов.



Рис. Схема методологического подхода к оценке качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров

Качество кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров формируется под влиянием комплекса факторов, включающих свойства исходного сырья, особенности технологической обработки, а также условия хранения и реализации продукции.

Качество непродовольственных товаров представляет собой совокупность свойств, обусловливающих их пригодность удовлетворять определённые потребности. Это особенно актуально для кожевенно-обувных и меховых изделий, поскольку их эксплуатационные характеристики напрямую связаны с физико-механическими свойствами материалов.

Для кожевенно-обувных товаров ключевыми являются показатели прочности, эластичности и устойчивости к внешним воздействиям. В то же время для пушно-меховых изделий определяющее значение имеют показатели густоты меха, прочности волоса и состояния кожевой ткани.

Для наглядного представления результатов систематизации показателей качества была составлена таблица 1.

Таблица 1

Современные методы экспертизы качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров в условиях цифровизации

Группа товаров	Показатели качества	Характеристика
Кожевенно-обувные	Прочность кожи	Способность материала выдерживать механические нагрузки
	Эластичность	Способность восстанавливать форму после деформации
	Износостойкость	Устойчивость к истиранию
	Качество швов	Прочность соединений и аккуратность выполнения
Пушно-меховые	Густота меха	Количество волос на единицу площади
	Прочность волоса	Устойчивость к ломкости
	Состояние кожевой ткани	Эластичность и прочность основы
	Устойчивость окраски	Сохранение цвета при эксплуатации

Дополнительно было выявлено, что на современном рынке наблюдается значительное увеличение доли продукции с дефектами, что связано как с удешевлением производства, так и с распространением фальсификации.

Экспертиза качества товаров является важнейшим инструментом выявления несоответствий и защиты прав потребителей. Однако традиционные методы не всегда позволяют выявить скрытые дефекты, особенно в условиях массового производства.

В ходе исследования были систематизированы наиболее распространённые дефекты продукции (табл. 2).

Таблица 2

Современные методы экспертизы качества кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров в условиях цифровизации

Группа товаров	Дефект	Причина возникновения
Кожевенно-обувные	Трещины кожи	Низкое качество сырья или нарушение технологии обработки
	Неравномерная окраска	Ошибки при окрашивании
	Слабые швы	Нарушение технологии сборки
Пушно-меховые	Выпадение волоса	Некачественная обработка сырья
	Искусственная имитация меха	Фальсификация продукции
	Низкая густота меха	Использование низкосортного сырья

Особое внимание следует уделить проблеме фальсификации товаров, которая в последние годы приобретает всё более масштабный характер. На практике это проявляется в замене натуральных материалов синтетическими аналогами, а также в снижении качества продукции при сохранении её рыночной стоимости.

Как подчёркивается в научной литературе, распространение фальсифицированной продукции снижает доверие потребителей и требует совершенствования методов контроля качества. В этой связи возрастает значение современных технологий экспертизы.

Внедрение цифровых решений, включая методы компьютерного зрения и искусственного интеллекта, позволяет существенно повысить объективность оценки качества. Такие технологии способны выявлять микродефекты поверхности, анализировать структуру материала и прогнозировать срок службы изделий.

Таким образом, проведённый анализ показывает, что эффективная система оценки качества должна основываться на сочетании традиционных и инновационных методов, что обеспечивает более высокую точность и достоверность результатов экспертизы.

В результате проведённого исследования установлено, что качество кожевенно-обувных и пушно-меховых товаров определяется совокупностью физико-механических, эстетических и эксплуатационных характеристик, формирующихся на всех этапах жизненного цикла продукции – от выбора сырья до реализации конечному потребителю.

Анализ показал, что традиционные методы экспертизы, включая органолептические, физико-механические и лабораторные, продолжают играть ключевую роль в системе оценки качества. Однако их применение связано с рядом ограничений, среди которых можно выделить зависимость результатов от квалификации эксперта, значительную трудоёмкость и невозможность выявления ряда скрытых дефектов.

В то же время современные технологии, основанные на цифровизации процессов, открывают новые возможности для повышения эффективности

экспертизы. Использование методов компьютерного анализа, автоматизированных систем контроля и элементов искусственного интеллекта позволяет повысить объективность оценки, сократить временные затраты и обеспечить более высокий уровень точности результатов.

Особую значимость полученные результаты приобретают в условиях роста электронной торговли, где отсутствует возможность непосредственного контакта потребителя с товаром. В таких условиях возрастает роль достоверной и комплексной экспертизы как инструмента обеспечения качества и повышения доверия к продукции.

Выявленная в ходе исследования проблема фальсификации продукции требует дальнейшего совершенствования методов диагностики и усиления контроля качества на всех этапах товародвижения. Это предполагает не только внедрение новых технологий, но и развитие нормативной базы, а также повышение квалификации специалистов в области товароведения.

Таким образом, перспективным направлением развития системы экспертизы является интеграция традиционных и инновационных методов оценки качества, что позволит сформировать комплексный подход, обеспечивающий достоверность результатов, снижение рисков приобретения некачественной продукции и повышение конкурентоспособности товаров на рынке.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при проведении товароведческой экспертизы, а также в учебной и профессиональной деятельности специалистов в области оценки качества непродовольственных товаров.

Список литературы

1. Николаева М.А. Товароведение непродовольственных товаров / М.А. Николаева.- Москва: Норма, 2018.- 464 с.
2. Ковалев А.И. Экспертиза качества товаров / А.И. Ковалев, В.П. Козлов.- Москва: Юрайт, 2020,- 312 с.
3. Федорова Л.В. Товароведение и экспертиза кожевенно-обувных товаров / Л.В. Федорова // Товаровед продовольственных и непродовольственных товаров. 2019. № 3.- С. 45–52.
4. Росстандарт. Национальные стандарты Российской Федерации. Текст: электронный // Официальный сайт Росстандарта: [сайт].- 2023. URL: https://www.gost.ru (дата обращения: 26.04.2026).
5. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. База стандартов. Текст: электронный // [сайт].- 2024. URL: https://protect.gost.ru (дата обращения: 26.04.2026).

Аманкулыев Э.М.
преподаватель
Туркменский сельскохозяйственный институт
Туркменистан, Дашогуз
Эрметова В.И.
преподаватель
Туркменский сельскохозяйственный институт
Туркменистан, Дашогуз

СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И БУДУЩЕЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Аннотация. В данной статье рассматривается взаимосвязь информационных технологий (ИТ) и компьютерной инженерии (КИ), их роль в современной экономике и тенденции развития. Основное внимание уделяется синтезу аппаратного и программного обеспечения, интеграции искусственного интеллекта и вопросам кибербезопасности.

Ключевые слова: компьютерная инженерия, аппаратное обеспечение и микроархитектура, информационные технологии (IoT) и системная интеграция, искусственный интеллект и Интернет вещей (IoT), перспективы на будущее, квантовые вычисления.

Amankulyev E.M.
Lecturer
Turkmen Agricultural Institute
Dashoguz, Turkmenistan
Ermetova V.I.
Lecturer
Turkmen Agricultural Institute
Turkmenistan, Dashoguz

MODERN SCIENTIFIC FOUNDATIONS AND THE FUTURE OF INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER ENGINEERING

Abstact. This article examines the relationship between information technology (IT) and computer engineering (CI), their role in the modern economy and development trends. The main focus is on the synthesis of hardware and software, the integration of artificial intelligence, and cybersecurity issues.

Keywords: computer engineering, hardware and microarchitecture, information technology (IoT) and system integration, artificial intelligence and the Internet of Things (IoT), future prospects, quantum computing.

Современный мир можно назвать «цифровой эпохой». Информационные технологии и компьютерная инженерия, являющиеся ядром Четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0), – это не просто технические системы, но и сила, меняющая все аспекты социальной жизни. В то время как компьютерная инженерия создает аппаратное обеспечение, информационные технологии предлагают эффективные методы обработки информации с использованием этого оборудования (программного обеспечения и систем).

Компьютерная инженерия находится на стыке физики, математики и электротехники. Эта область охватывает широкий спектр дисциплин, от проектирования микропроцессоров до архитектуры суперкомпьютеров.

• **Микроэлектроника и СБИС:** уменьшение размеров транзисторов (в соответствии с законом Мура) привело к созданию более мощных и энергоэффективных систем.

Закон Мура, исторически удваивавший количество транзисторов каждые два года, сегодня сталкивается с физическим пределом: при размерах менее 3–5 нанометров начинают преобладать квантовые эффекты (туннелирование электронов). Инженерия отвечает на это новыми архитектурами:

FinFET и GAA (Gate-All-Around): трехмерные транзисторы, где затвор окружает канал со всех сторон, что позволяет лучше контролировать ток утечки.

Гетероструктуры и новые материалы: использование графена, фосфида индия и других соединений вместо традиционного кремния для повышения скорости переключения.

Фотоника: передача данных внутри чипа не электронами, а фотонами (светом), что снимает ограничения по пропускной способности и тепловыделению медных проводников.

• **Встроенные системы:** Сегодня специализированные компьютерные системы работают во всех сферах жизни – от автомобилей до медицинских приборов.

Информационные технологии охватывают процессы сбора, хранения, защиты и распространения информации. Развитие ИТ привело к экспоненциальному росту объёма данных (большие данные).

Это специализированные компьютеры, интегрированные в другие устройства. В отличие от ПК, они часто работают в реальном времени (Real-Time Operating Systems, RTOS).

Автомобилестроение: современный автомобиль содержит более 100 электронных блоков управления (ECU). Система ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) объединяет данные с лидаров, радаров и камер через высокоскоростную сеть автомобиля (CAN-FD, Ethernet Automotive) для предотвращения столкновений.

Медицина: имплантируемые кардиовертеры-дефибрилляторы (ИКД) и инсулиновые помпы используют энергоэффективные процессоры для анализа ритмов сердца или уровня глюкозы ежесекундно.

Если компьютерная инженерия создает инструмент, то ИТ определяют правила игры, алгоритмы и способы извлечения ценности из собранных битов.

Большие данные (Big Data) и конвейеры обработки: Экспоненциальный рост данных требует отказа от традиционных реляционных БД в пользу распределенных систем. Классическая модель работы описывается парадиг-

мой ELT/ELT (Extract, Load, Transform). Данные проходят через озера данных (Data Lakes на базе объектного хранилища S3/MinIO) и обрабатываются фреймворками вроде Apache Spark или Flink, способными анализировать петабайты информации в режиме, близком к реальному времени.

• **Облачные вычисления:** хранение и обработка данных на удаленных виртуальных платформах, а не на локальных серверах, коренным образом изменили ИТ-инфраструктуру.

Эволюционировали от простой аренды серверов (IaaS) до бессерверных архитектур (Serverless / Functions as a Service). Ключевой особенностью стала виртуализация сетей (SDN — Software Defined Networking) и хранилищ (SDS — Software Defined Storage), позволяющая программно управлять физической инфраструктурой дата-центра. Контейнеризация (Docker) и оркестрация (Kubernetes) стали стандартом изоляции приложений, обеспечивая их переносимость между локальными серверами и облаками разных провайдеров.

• **Кибербезопасность:** цифровизация информации сделала ее защиту одной из самых актуальных проблем. Криптография и сетевая безопасность основаны на алгоритмах из области компьютерной инженерии.

Наиболее близким пересечением компьютерной инженерии и информационных технологий является искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение.

Цифровая защита перешла от реактивной модели (антивирусы по сигнатурам) к проактивной (Zero Trust Architecture — концепция «нулевого доверия», где ни одно устройство или пользователь не считаются безопасными по умолчанию).

Криптография: Повсеместное внедрение протоколов TLS 1.3 защищает трафик. Особое значение приобретает постквантовая криптография (PQC) — разработка алгоритмов шифрования, устойчивых к атакам будущих квантовых компьютеров (на основе решеток или хеш-функций).

Биометрия и MFA: Аппаратные ключи безопасности (FIDO2) вытесняют уязвимые SMS-коды для многофакторной аутентификации.

• **Аппаратная поддержка:** ИИ стал главным драйвером спроса на инновации в обеих сферах. Нейронные сети требуют колоссальных объемов вычислений, что заставляет инженеров пересматривать саму архитектуру компьютеров.

Для ускорения работы алгоритмов искусственного интеллекта были разработаны специализированные аппаратные средства, такие как графические процессоры (GPU) и тензорные процессоры (TPU). Традиционная архитектура фон Неймана, где процессор отдельно, а память отдельно, становится узким местом (bottleneck) из-за необходимости постоянно перемещать веса нейросети. Решением становятся:

- TPU (Tensor Processing Unit): процессоры Google, оптимизированные под операцию матричного умножения (основа нейросетей).

- Нейроморфные чипы (Intel Loihi, IBM TrueNorth): имитируют работу биологических нейронов и синапсов, потребляя в тысячи раз меньше энергии для специфических задач распознавания образов.
- In-memory computing: вычисления прямо в ячейках памяти, что исключает задержки на передачу данных.

- **ИТ-экосистема:** Благодаря «Интернету вещей» каждое устройство подключено к коммуникационной сети и обменивается информацией. Это требует автоматического анализа больших объемов данных.

Архитектура IoT состоит из трех уровней: оконечные устройства (датчики с микроконтроллерами), туманные вычисления (Edge Computing — предварительная обработка данных рядом с источником для снижения задержек) и централизованное облако. Протоколы связи варьируются от энергоэффективных LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) для умных счетчиков до 5G URLLC для беспилотного транспорта. Генеративный ИИ встраивается в эту экосистему для создания цифровых двойников (Digital Twins) реальных объектов, позволяя симулировать износ турбины или логистику склада без вмешательства в физические процессы.

Следующим важным шагом в компьютерной инженерии станут квантовые компьютеры. Использование кубитов вместо традиционных битов (0 и 1) может увеличить скорость вычислений в 2^n раз. Это может произвести революцию в существующих методах шифрования и обеспечить прорывы в таких областях, как медицина и материаловедение.

Квантовые компьютеры не просто быстрее классических, они работают на иных физических принципах.

Кубиты и типы реализации: Кубит может находиться в состоянии суперпозиции (одновременно 0 и 1) и быть запутанным с другими кубитами. Существует несколько технологических платформ:

Сверхпроводящие кубиты (Google, IBM): требуют охлаждения до температур, близких к абсолютному нулю (около 15 милликельвинов).

Фотонные кубиты: работают при комнатной температуре, но сложны в управлении.

Ионы в ловушках: обладают высокой точностью операций, но сложно масштабируются.

Угроза и решение для шифрования: Алгоритм Шора позволит квантовому компьютеру взламывать асимметричное шифрование (RSA, ECC), на котором держится весь современный интернет-банкинг. Это стимулирует глобальный переход на стандарты постквантовой криптографии уже сейчас.

Прорывы в науке: Квантовое моделирование позволит предсказывать свойства новых материалов (например, высокотемпературных сверхпроводников) или структуру сложных белковых молекул для фармацевтики напрямую, без дорогостоящих натурных экспериментов.

Утверждение о неразрывности КЭ и ИТ подтверждается концепцией Hardware-Software Co-design. Современный прогресс невозможен без проектирования технических средств и софта одновременно. Примером служит

архитектура Apple Silicon (чипы серии M): инженеры создали специальные блоки (Neural Engine, Secure Enclave) на уровне транзисторов исключительно под конкретные программные задачи своей ОС, достигая недостижимой для универсальных ПК энергоэффективности. Другой пример — API CUDA от NVIDIA, который намертво связывает возможности их GPU с инструментарием разработчиков машинного обучения.

Дальнейшее развитие этого единого организма приведет к следующим изменениям:

Экономика метавселенных и пространственного интернета: Потребует еще более плотной интеграции сенсоров (КЭ) и рендеринга миров в реальном времени (ИТ), стирая грань между физической и дополненной реальностью.

Автономные децентрализованные организации (DAO) и смарт-контракты: ИТ-инфраструктура блокчейна возьмет на себя функции арбитра в экономических сделках, исключая посредников.

Технологический суверенитет: В глобальном мире зависимость от чужой микроэлектронной базы или облачных сервисов является критической уязвимостью. Это делает приоритетным полный цикл производства — от выращивания монокристаллов кремния и литографического оборудования (глубокий уровень КЭ) до собственных компиляторов, операционных систем и математических библиотек (глубокий уровень ИТ). Способность государства проектировать и производить собственные процессоры, развивать национальные облака и стандарты шифрования становится таким же элементом национальной безопасности, как энергетика или продовольствие.

Информационные технологии и компьютерная инженерия – это единый организм, неразделимый друг от друга. Чем больше развивается аппаратное обеспечение (КЭ), тем сложнее и интеллектуальнее становится программное обеспечение (ИТ). В будущем дальнейшее развитие этих областей обеспечит полный переход общества к цифровой экономике и технологическому суверенитету.

Список литературы

1. Паттерсон, Д.А., и Хеннесси, Дж.Л. Организация и проектирование компьютеров: аппаратно-программный интерфейс. Morgan Kaufmann. Компьютерная архитектура и аппаратное обеспечение. 2020 год.

2. Стэллингс, У. Компьютерная безопасность: принципы и практика. Пирсон. Основы кибербезопасности и защиты информации. 2017 год.

3. Цифровая библиотека IEEE Xplore. Последние тенденции в компьютерной инженерии и информационных технологиях. Цифровой репозиторий актуальных научных статей и новых открытий. 2024 год.

Корень И.С.
главный специалист Центра сельскохозяйственного машиностроения
ФГУП «НАМИ»
Россия, Москва
ivan.koren@nami.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ БЕСПИЛОТНЫХ САМОХОДНЫХ МАШИН В ЕАЭС И ЕВРОПЕЙСКОМ СОЮЗЕ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема отставания нормативно-технической базы Евразийского экономического союза (ЕАЭС) от темпов развития беспилотной самоходной техники. Показано, что действующие технические регламенты ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» и ТР ТС 031/2012 «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» были разработаны до широкого внедрения автономных систем и не содержат требований к искусственному интеллекту, кибербезопасности, автономному управлению и отказоустойчивости алгоритмов. Это создаёт правовую неопределённость и барьеры для вывода инновационной продукции на рынок. Проведён анализ нового Регламента Европейского союза (ЕС) 2023/1230, который заменил Директиву 2006/42/ЕС и впервые на законодательном уровне вводит понятия «самоходная мобильная машина» и «автономная мобильная машина», включает требования к программному обеспечению, искусственному интеллекту, кибербезопасности и геозонам. Выявлены ключевые различия в подходах: от отсутствия в ЕАЭС процедур оценки автономных систем до наличия в ЕС переходного периода и усиленной ответственности за модификацию техники. На основе сравнительного анализа предложены направления совершенствования нормативной базы ЕАЭС, включая внесение изменений в технические регламенты, разработку методик испытаний и создание специализированной инфраструктуры оценки соответствия.

Ключевые слова: техническое регулирование, беспилотная самоходная техника, ТР ТС 010/2011, Регламент (ЕС) 2023/1230, автономные мобильные машины, искусственный интеллект, кибербезопасность, оценка соответствия, гармонизация законодательства

Koren I.S.
Chief Specialist of the Agricultural Machinery Center,
FSUE «NAMI»
Russia, Moscow
ivan.koren@nami.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO THE TECHNICAL REGULATION OF UNMANNED SELF-PROPELLED MACHINES IN THE EAEU AND THE EUROPEAN UNION

Abstact. The article addresses the pressing issue of the Eurasian Economic Union's (EAEU) regulatory and technical framework lagging behind the development pace of unmanned self-propelled machinery. It is shown that the current technical regulations – TR CU 010/2011 "On the Safety of Machinery and Equipment» and TR CU 031/2012 "On the Safety of Agricultural and Forestry Tractors and Their Trailers» – were developed before the widespread adoption of autonomous systems and do not include requirements for artificial intelligence, cybersecurity, autonomous control, or algorithm fault tolerance. This creates legal uncertainty and poses barriers to bringing innovative products to market. An analysis is conducted of the

new European Union (EU) Regulation 2023/1230, which replaced Directive 2006/42/EC and, for the first time at the legislative level, introduces the concepts of “self-propelled mobile machine» and “autonomous mobile machine». It also includes requirements for software, artificial intelligence, cybersecurity, and geo-zones. Key differences in approaches have been identified: from the EAEU’s lack of procedures for assessing autonomous systems to the EU’s provision of a transitional period and enhanced liability for equipment modifications. Based on the comparative analysis, directions for improving the EAEU’s regulatory framework are proposed. These include amending technical regulations, developing testing methodologies, and establishing a dedicated conformity assessment infrastructure.

Keywords: Technical regulation, unmanned self-propelled machinery, TR CU 010/2011, Regulation (EU) 2023/1230, autonomous mobile machines, artificial intelligence, cybersecurity, conformity assessment, harmonization of legislation.

Современный этап развития технологий характеризуется стремительной роботизацией и цифровизацией всех отраслей экономики, включая транспорт, сельское хозяйство, строительство и промышленность. Беспилотная роботизированная самоходная техника (далее – беспилотная техника) способна функционировать без непосредственного участия человека, используя системы технического зрения, искусственного интеллекта и автономного навигационного управления. Однако внедрение таких систем наталкивается на серьезный нормативный барьер: законодательство, регламентирующее безопасность машин и оборудования, в большинстве юрисдикций разрабатывалось в эпоху, когда техникой управлял оператор.

На пространстве Евразийского экономического союза (ЕАЭС) базовыми документами в этой сфере являются ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» и ТР ТС 031/2012 «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним». Их анализ показывает, что они ориентированы на традиционную технику и не учитывают специфику автономных систем. В результате производители инновационной продукции сталкиваются с правовой неопределенностью, отсутствием утвержденных методик испытаний и невозможностью пройти обязательную сертификацию.

В отличие от ЕАЭС, Европейский союз (ЕС) предпринял системные шаги по модернизации законодательства. В июле 2023 года вступил в силу Регламент (ЕС) 2023/1230 о безопасности машин (Machinery Regulation), который придет на смену Директиве 2006/42/ЕС и будет обязательным к применению с 2027 года. Этот документ впервые на наднациональном уровне вводит требования к автономным и самоходным мобильным машинам, включая аспекты искусственного интеллекта, кибербезопасности и удаленного управления.

Цель настоящей работы – провести сравнительный анализ подходов к техническому регулированию беспилотной техники в ЕАЭС и ЕС, выявить системные пробелы в законодательстве ЕАЭС и предложить пути их устранения с учетом европейского опыта. Новизна исследования заключается в

детальном сопоставлении конкретных положений ТР ТС 010/2011 и Регламента (ЕС) 2023/1230,

Исследование базируется на сочетании методов сравнительного правоведения, системного анализа и документального анализа.

1. Сравнительно-правовой метод позволил провести параллельное сопоставление текстов ТР ТС 010/2011, ТР ТС 031/2012 и Регламента (ЕС) 2023/1230, а также отменяемой Директивы 2006/42/ЕС. Сравнение проводилось по следующим ключевым параметрам: объект регулирования, наличие определений автономных машин, требования к системам управления и программному обеспечению, требования кибербезопасности, процедуры оценки соответствия, ответственность за модификации, переходные положения.
2. Системный анализ применен для выявления взаимосвязей между технологическими характеристиками беспилотной техники (уровни автоматизации, наличие искусственного интеллекта, удаленное вмешательство) и отсутствующими в законодательстве ЕАЭС нормами.
3. Метод документального анализа использован для изучения материалов технических комитетов по стандартизации Российской Федерации (ТК 164 «Искусственный интеллект», ТК 284 «Тракторы и машины сельскохозяйственные», ТК 056 «Дорожный транспорт», ТК 267 «Строительно-дорожные машины»), а также дорожных карт разработки национальных стандартов.

Информационной базой послужили официальные тексты технических регламентов, регламентов ЕС, данные Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), а также открытые отчеты о деятельности технических комитетов.

Анализ действующей нормативной базы ЕАЭС: системные проблемы

Проведенный анализ ТР ТС 010/2011 и ТР ТС 031/2012 выявил следующие системные недостатки, препятствующие внедрению беспилотной техники:

1. **Отсутствие определений для автономных систем**. В регламентах техника рассматривается исключительно как устройство, управляемое человеком-оператором. Отсутствуют определения «автономный режим работы», «система автоматического управления», «удаленный оператор», «беспилотная мобильная машина». Это делает невозможным юридически значимое описание беспилотной техники.
2. **Отсутствие требований к автономным системам управления**. Регламенты не содержат норм, касающихся алгоритмов принятия решений, распознавания препятствий, планирования маршрута, поведения в нештатных ситуациях. Без таких требований невозможно подтвердить безопасность автономного функционирования.

3. **Отсутствие требований к кибербезопасности**. Беспилотная техника потенциально уязвима для кибератак, подмены сигналов спутниковой навигации, несанкционированного доступа к системам управления. Однако регламенты не устанавливают минимальных требований к защите от таких угроз, в отличие от, например, автомобильной отрасли (*Правила ЕЭК ООН N 155 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении кибербезопасности и их систем обеспечения кибербезопасности*).

4. **Отсутствие процедур предоставления доказательных материалов**. Производитель, желающий сертифицировать беспилотную машину, не может руководствоваться существующими схемами оценки соответствия, поскольку они не предусматривают проверку характеристик, связанных с автономностью.

5. **Отсутствие методик испытаний беспилотной техники**. Отсутствуют утвержденные методики испытаний систем автономного управления, сценарии тестирования, критерии приемки. Это приводит к тому, что даже при наличии разработанных национальных стандартов (о которых речь пойдет ниже) их применение для целей обязательной оценки соответствия невозможно без изменений в регламентах.

В качестве примера можно привести ситуацию с сельскохозяйственным беспилотным трактором. Для выхода на рынок ЕАЭС он должен соответствовать ТР ТС 031/2012, который требует проверки тормозных систем, рулевого управления, освещения и т.д., но не содержит ни одного требования к системе автоматического вождения, детекции препятствий или удаленной остановке. Формально такой трактор невозможно сертифицировать, так как схема оценки соответствия предполагает проверку всех требований, а требования к автономной функции отсутствуют.

Регламент ЕС 2023/1230 как новая модель регулирования

Детальный анализ Регламента (ЕС) 2023/1230 (далее – Регламент) показал, что он представляет собой принципиально новый подход к регулированию машинного оборудования, учитывающий вызовы цифровой эпохи. Ключевые нововведения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Ключевые нововведения Регламента (ЕС) 2023/1230 по сравнению с Директивой 2006/42/ЕС

Параметр	Директива 2006/42/ЕС	Регламент (ЕС) 2023/1230
Подход	Гармонизация национальных законодательств	Прямое действие на всей территории ЕС
Определение автономной машины	Отсутствует	Введено понятие «автономная мобильная машина» (autonomous mobile machinery)
Самоходные машины	Не выделялись	Введено понятие «самоходная мобильная машина» (self-propelled mobile machinery)
Искусственный интеллект	Не упоминался	Прямо включен в сферу регулирования; требует оценки рисков, связанных с ИИ
Программное обеспечение	Рассматривалось косвенно	Требования включены; обновления ПО рассматриваются как модификация машины
Кибербезопасность	Отсутствовала	Требования к защите от кибератак и случайных угроз
Удаленное управление	Не регулировалось	Требования к каналам связи, времени задержки, процедурам экстренной остановки
Геозоны	Не предусматривались	Требование определения рабочих границ для автономного движения
Ответственность за модификацию	Нечеткая/косвенно	Установка систем автономного вождения на существующую технику возлагает ответственность на модификатора
Переходный период	–	До 14 января 2027 года (возможность выбора между Директивой и Регламентом)

Особого внимания заслуживает подход Регламента (ЕС) 2023/1230 к функциональной безопасности и кибербезопасности. В отличие от ТР ТС 010/2011, который никак не регулирует эти аспекты, Регламент (ЕС) 2023/1230 требует, чтобы автономные мобильные машины были спроектированы так, чтобы:

- риск, связанный с автономными функциями, был устранен или снижен насколько это возможно;
- в случае сбоя системы управления машина переходила в безопасное состояние (например, остановку);
- были предусмотрены средства для экстренного вмешательства оператора (в том числе дистанционного);
- программное обеспечение и данные, важные для безопасности, были защищены от преднамеренного или непреднамеренного повреждения.

Регламент (ЕС) 2023/1230 также вводит новые требования к сопроводительной документации. В инструкции по эксплуатации автономной машины должны быть указаны:

- условия безопасной эксплуатации в автономном режиме;
- порядок запуска, остановки и экстренного вмешательства;
- границы рабочей среды (геозоны) и методы их определения;
- остаточные риски, связанные с автономным функционированием.

Важным элементом является переходный период: до 14 января 2027 года производители могут выбирать, сертифицировать ли машину по старой Директиве 2006/42/ЕС или по новому Регламенту. С 15 января 2027 года Регламент становится обязательным. Это дает отрасли время на адаптацию.

Сравнительный анализ: ТР ТС 010/2011 и Регламента (ЕС) 2023/1230

Прямое сравнение двух документов позволяет продемонстрировать разрыв в подходах (таблица 2).

Таблица 2

Сравнение ТР ТС 010/2011 и Регламента (ЕС) 2023/1230

Критерий сравнения	ТР ТС 010/2011	Регламент (ЕС) 2023/1230
Год принятия	2011	2023
Цель	Безопасность машин и оборудования при традиционном управлении	Безопасность машин в условиях цифровизации, автономности, ИИ
Наличие определения автономной машины	Нет	Да («автономная мобильная машина»)
Требования к ИИ	Нет	Да (оценка рисков, связанных с ИИ)
Требования к ПО	Нет	Да (обновления = модификация, защита данных)
Требования к кибербезопасности	Нет	Да (защита от кибератак, безопасность связи)
Требования к дистанционному управлению	Нет	Да (задержка, экстренная остановка)
Процедуры оценки для автономных систем	Отсутствуют	Разрабатываются (гармонизированные стандарты)
Ответственность за модификацию	Не определена	Прямо возложена на модификатора
Переходный период	–	4 года (2023–2027)

Как видно из таблицы, ТР ТС 010/2011 не содержит ни одного из ключевых элементов, необходимых для регулирования беспилотной техники.

При этом важно подчеркнуть, что ТР ТС 031/2012 имеет аналогичные недостатки, так как он был принят практически в тот же период и базируется на тех же принципах.

Состояние работ по стандартизации в Российской Федерации

В России, несмотря на пробелы в технических регламентах, ведется активная работа по созданию национальных стандартов для высокоавтоматизированной техники. Результаты анализа деятельности технических комитетов представлены ниже.

ТК 164 «Искусственный интеллект» – разработаны 1 ПНСТ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) и 1 ГОСТ Р («Когнитив роботикс»). Эти документы касаются общих вопросов применения ИИ в технике, но не содержат конкретных методов испытаний.

ТК 284 «Тракторы и машины сельскохозяйственные» – силами ФГУП «НАМИ» разработаны 3 ГОСТ Р. Планируется разработка еще 2 ГОСТ Р в 2026 году. Эти стандарты ориентированы на терминологию и общие требования безопасности.

ТК 056 «Дорожный транспорт» – наиболее продуктивный комитет в части количественных результатов: разработаны 22 ГОСТ Р, в разработке находятся 14 ГОСТ Р. Часть из них (например, касающиеся автоматизированных систем вождения) потенциально применимы к самоходным шасси сельскохозяйственной и строительной техники.

ТК 267 «Строительно-дорожные машины и оборудование» – разработаны 6 ГОСТ ИСО (гармонизированных с международными стандартами), 5 ГОСТ Р и 2 ПНСТ. Планируется разработка 11 ГОСТ Р в 2025–2026 гг.

Всего на уровне национальных стандартов разработано или находится в разработке более 60 документов, так или иначе связанных с автоматизацией и роботизацией техники. Однако ключевая проблема остается: эти стандарты носят добровольный характер и не могут быть использованы для обязательной оценки соответствия, пока соответствующие требования не будут внесены в технические регламенты ТС.

Предложения по гармонизации законодательства ЕАЭС

На основе проведенного сравнительного анализа предлагается следующий комплекс мер по модернизации нормативной базы ЕАЭС:

1. **Внесение изменений в технические регламенты** (ТР ТС 010/2011 и ТР ТС 031/2012) путем добавления отдельных разделов или приложений, посвященных требованиям к беспилотной технике. Эти разделы должны включать:
   - определения автономного режима работы, удаленного управления, системы автоматического вождения;
   - требования к функциональной безопасности автономных систем;

- требования к кибербезопасности и защите от несанкционированного доступа;
- требования к удаленному вмешательству и экстренной остановке;
- требования к документации (границы рабочей среды, геозоны, сценарии нештатных ситуаций).

2. **Принятие на переходный период Правил применения обязательных требований** (по аналогии с Постановлением Правительства РФ № 855 от 12.05.2022 г. «Об утверждении Правил применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия»), которые позволили бы использовать национальные стандарты в качестве доказательной базы до официального внесения изменений в регламенты. Это сократит время вывода инновационной продукции на рынок.

3. **Разработка и утверждение методик испытаний** для автономных машин, включая:
- сценарии тестирования в типовых производственных условиях;
- процедуры проверки распознавания препятствий и безопасности маневра;
- методы оценки устойчивости к кибератакам (в том числе к подмене GNSS-сигнала);
- критерии приемки для различных уровней автоматизации (SAE J3016).

4. **Аккредитация испытательных лабораторий и создание специализированных полигонов**. Существующая инфраструктура испытаний в России (например, полигоны НАМИ, НЦИАП) требует дооснащения средствами для валидации автономных систем в различных агроклиматических зонах.

5. **Гармонизация с международными стандартами**. Целесообразно продолжить работу по переводу и адаптации стандартов серии ISO 18497 (безопасность высокоавтоматизированных сельскохозяйственных машин), а также стандартов ИСО/МЭК по кибербезопасности (серия 27000) и функциональной безопасности (IEC 61508).

Проведенное исследование показало, что действующая нормативно-техническая база ЕАЭС не готова к легализации и безопасной эксплуатации беспилотной самоходной техники. Технические регламенты ТР ТС 010/2011 и ТР ТС 031/2012, разработанные до активного внедрения автономных систем, содержат системные пробелы: отсутствие понятийного аппарата, требований к искусственному интеллекту, кибербезопасности, автономному управлению и процедур их оценки.

Напротив, Европейский союз, приняв Регламент (ЕС) 2023/1230, продемонстрировал способность законодательства адаптироваться к технологическим вызовам. Европейский подход включает в себя введение новых категорий машин (самоходные, автономные мобильные), требования к ПО,

ИИ и кибербезопасности, а также переходный период для плавной адаптации промышленности.

В России и других странах ЕАЭС ведется значительная работа по разработке национальных стандартов в этой области (более 60 документов). Однако без изменений в технических регламентах эти стандарты остаются необязательными для целей обязательной сертификации.

Ключевым выводом является необходимость синхронизации деятельности технических комитетов по стандартизации с процессом актуализации наднациональных технических регламентов ЕАЭС. В качестве первоочередной меры предлагается принять на переходный период правила, аналогичные ПП РФ № 855 от 12.05.2022 г. «Об утверждении Правил применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия», которые позволили бы использовать уже разработанные ГОСТ Р и ПНСТ в качестве доказательной базы. В долгосрочной перспективе требуется фундаментальное обновление ТР ТС 010/2011 и ТР ТС 031/2012.

Реализация предложенных мер позволит устранить правовую неопределенность, ускорить вывод на рынок инновационной беспилотной техники и создать условия для цифровой трансформации ключевых отраслей экономики ЕАЭС – сельского хозяйства, транспорта, строительства и промышленности.

Список литературы

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» (принят Решением Комиссии Таможенного союза от 18.10,2011 № 823). – 2011.
2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 031/2012 «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 20,07.2012 № 60). – 2012.
3. Regulation (EU) 2023/1230 of the European Parliament and of the Council of 14 June 2023 on machinery and repealing Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council.
4. Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on machinery.
5. ISO 18497:2018. Agricultural machinery and tractors – Safety of highly automated agricultural machines – Principles for design. – International Organization for Standardization, 2018.
6. SAE J3016:2021. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles. – SAE International, 2021
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 23.10,2019 № 855 «Об утверждении Правил применения обязательных требований к отдельным видам машин и оборудования». 2019.
8. Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании»

Ubaiddullaeva S.V.
Student
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov
Kazakhstan, Karaganda
sarvinoz.ubaidullaeva06@gmail.com
Pazilkhanova S.A.
Student
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov
Kazakhstan, Karaganda
sevincpazylhanova@gmail.com
Karimova Z.N.
Lecturer of the Department of Translation Theory and Practice
Karaganda National Research University named after academician Ye.A. Buketov
Kazakhstan, Karaganda
z.nurtaykyzy@mail.ru

THE ROLE OF DAILY ROUTINE IN ADOLESCENTS' ENGLISH LANGUAGE LEARNING

Abstract. This study examines the role of daily routine in English language learning and highlights the formation of a secondary linguistic personality as a primary goal of foreign language instruction. According to B. Kachru, the English language is not a uniform, standardized system but comprises several varieties used in diverse cultural and social contexts. Systematic daily practice fosters the development of listening, reading, writing, and speaking skills, as well as the formation of communicative competence.

Modern digital tools (Duolingo, Quizlet, BBC Learning English) make it possible to effectively organize daily study sessions. A structured daily routine fosters efficient time management, boosts motivation, and helps develop the skills for continuous (lifelong) language learning.

Keywords: English language, second language personality, daily routine, communicative competence, language learning.

English continues to expand rapidly as a global language. According to B. Kachru (1985, 1992, 2005), it is not a single standardized system; rather, it comprises multiple varieties that function within diverse cultural and social contexts. The spread from «inner circle» countries (the United Kingdom, the USA, Australia, New Zealand) to «outer circle» countries (India, Singapore, the Philippines, Nigeria, Ghana, etc.) highlights its multifaceted nature. In these regions, English adapts to local cultural contexts through processes called nativization or indigenization (Richards, 1979). For instance, Indian English preserves indigenous cultural features while serving as a medium for international communication, demonstrating that English exists both as a global language and as locally adapted varieties.

The traditional distinction between «native» and «non-native» speakers has been increasingly challenged due to the worldwide spread of English. Scholars such as Medgyes (1994), Crystal (1999), McArthur (2001), and McKay (2002) assert that all English varieties are legitimate and equally functional. Teachers who have experienced language learning themselves may possess an advantage, as they are

more attuned to learners' difficulties. Modern approaches prioritize communicative competence over mere grammatical knowledge. Communicative competence refers to the learner's ability to apply linguistic knowledge effectively in real-life contexts across listening, speaking, reading, and writing [1, p. 204–205].

The primary goal of foreign language instruction is to develop a second language persona. According to N.D. Galskova, a second language persona is a set of abilities that enables an individual to communicate effectively in a foreign language at an intercultural level. This concept implies the capacity to interact correctly and efficiently with representatives of other cultures.

These abilities consist of two main components:

- **Mastery of the verbal-semantic code of the target language**, meaning the understanding of the «linguistic worldview» of native speakers;
- **The general conceptual worldview**, which allows an individual to comprehend new social realities.

The integration of these two components enables a person to use a foreign language not only grammatically but also freely in cultural and communicative contexts [3. p, 50].

Language is a complex, multi-layered system, incorporating phonetic, lexical, grammatical, and semantic components, and it is intrinsically linked to cognition, culture, and social interaction. Learning and teaching processes are interdependent: learning involves the practical acquisition of skills through repeated use, while teaching provides guidance and structured support. In this context, a well-organized daily routine is fundamental to adolescents' English language development.

Daily routines facilitate language learning by emphasizing systematic and repetitive engagement. Learners use English both in and out of the classroom, ensuring continuous exposure. Frequent practice strengthens memory retention and accelerates the automation of skills. Research in language acquisition indicates that repetition and practice are crucial for internalizing linguistic material. Short daily exercises (10–20 minutes of reading, listening, or writing) are generally more effective than irregular, long sessions.

The communicative approach stresses that language learning must be contextually meaningful. Daily routines provide authentic situations–such as engaging with social media, watching videos, listening to music, reading texts, and conversing online–enabling learners to apply language practically and effectively [1, p. 205].

Regular engagement with English enhances all four core language skills:

- **Listening:** Daily exposure to audio and video materials improves comprehension, pronunciation, and intonation.
- **Reading:** Short texts, articles, social media posts, and subtitles expand vocabulary and strengthen reading speed and understanding.
- **Writing:** Writing short messages, diary entries, or comments reinforces grammar and encourages practical usage.

➢ **Speaking:** Daily conversations, repetition, and online interactions build confidence and fluency in verbal communication [2, p. 608].

Currently, one of the most relevant issues is the introduction of electronic textbooks into the educational process. According to S.S. Kunanbayeva, as a form of technologization of the educational process, various methods of e-learning create an educational environment with strong educational potential [6].

In addition, it should be noted that there is a limited number of methodological works devoted to teaching orthography; most of them date back to the period before 1961. In recent years, only a few studies on this issue have been published, whereas in foreign scientific literature considerably more attention is given to this topic.

According to the results of a survey conducted to identify which types of textbooks are considered insufficient and should be introduced into the educational process, it was found that there is a shortage of electronic books aimed at developing writing skills and listening comprehension abilities. [5] (Figure).

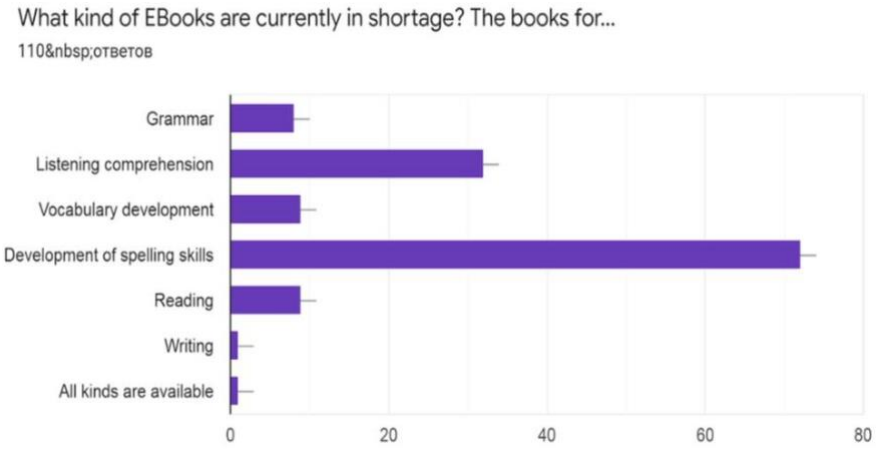


Fig. Types of eBooks currently in shortage [5, p. 70]

The survey results show the demand for different types of electronic textbooks. The highest score belongs to materials aimed at developing spelling skills (72), which indicates a clear shortage of electronic resources for forming correct writing skills in the learning process.The next highest demand is for listening comprehension materials (32), while the need for grammar resources is at a moderate level (15). Vocabulary development and reading skills have equal and relatively low indicators (8 each). The lowest results were recorded for writing skills (2) and for the option indicating that all types are available (2).

Overall, the data demonstrate that the most significant issue in the educational process is the lack of electronic textbooks focused on developing orthographic skills.

By integrating English into daily routines, learners develop each skill progressively while maintaining motivation and consistency.

A structured daily schedule enables learners to manage their time efficiently and fosters regular study habits. Consistent practice–such as 15–30 minutes daily for vocabulary review, listening, or reading–supports long-term memory and active use of new language items. H. Douglas Brown emphasizes that repetition and practical application are essential for skill development, while Stephen Krashen's Input Hypothesis highlights the importance of regular exposure to comprehensible input for effective language acquisition .

An example of an effective daily routine might include:

- Morning: 10 minutes reviewing new vocabulary
- Daytime: 15 minutes watching or listening to English content
- Evening: 10–20 minutes reading or constructing sentences

Digital platforms like Duolingo, Quizlet, and BBC Learning English facilitate structured daily practice, allowing learners to accomplish short tasks that progressively strengthen their abilities [1, p. 205].

A daily schedule provides a framework for systematic planning and prioritization of activities, including study, leisure, physical activity, and supplementary exercises. For adolescents, a well-organized routine improves academic performance, reduces stress, and enhances overall language proficiency.

Effective time management encourages learners to set goals, follow plans, and cultivate self-discipline. Consistency promotes motivation, engagement, and a sense of responsibility. Integrating English into daily life–through reading, listening, writing, and online interactions–supports skill development and maintains active participation.

Psychological and pedagogical perspectives support the importance of routine:

- **Behaviorism:** Skills are developed through repeated practice.
- **Cognitive theory:** Long-term memory retention relies on daily exposure and repetition.
- **Communicative approach:** Language proficiency grows through practical application.
- **Personal development:** Daily activities enhance overall learner competence.

Practically, engaging with texts, audio, and interactive activities strengthens communicative competence, facilitates vocabulary retention, and increases interest in learning [4. p, 320].

In summary, a structured daily routine is a central factor in successful English language acquisition. Systematic exposure, repetition, and practical use of language ensure the development of listening, reading, writing, and speaking skills. Well-organized routines support motivation, time management, and consistent practice, which are critical for adolescents. Modern digital tools further enhance these practices, offering diverse ways to reinforce language learning. By combining theoretical understanding with practical application, daily routines serve as an effective strategy for fostering linguistic competence and lifelong language learning habits.

Referenses

1. Brown, H. Douglas Principles of Language Learning and Teaching. – 5th ed. – New York: Pearson Education, 2007. – 488 p. (pp. 204–205).

2. Harmer, Jeremy The Practice of English Language Teaching. – 4th ed. – Harlow: Pearson Longman, 2007. – 608 p.

3. Гальскова Н.Д., Гез Н.И. nТеория обучения иностранным языкам. –Москва: Academia, 2006. – С. 50–90.

4. Kachru, Braj World Englishes. – Oxford: Oxford University Press, 1985–2005. – 320 p.

5. «Қазақстан Республикасындағы шет тілін оқыту: парадигмалар мен тенденциялар» Республикалық дөңгелек үстел материалдары. – Алматы, 16 наурыз 2022. – 42, 70 – 71 б.

6. Цыганова О.А., The Survey Study of Using Electronic textbooks in Kazakhstan, Shoqan Oqulary-25, Kokshetau, 2021, Vol 2.

СЕКЦИЯ 4
АВТОМАТИКА, РОБОТОТЕХНИКА И МЕХАТРОНИКА

Постникова Е.С.
к.т.н., доцент кафедры «Экономика и организация производства»
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва
postnikova.el@bmstu.ru
Постников А.В.
студент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
pav23b035@Student.bmstu.ru
Кошевой А.Р.
инженер
ИМАШ РАН
Россия, Москва
koshevoy97@inbox.ru

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ДАННЫХ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ВИБРОМОНИТОРИНГА

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения качества поверхностного слоя деталей при механической обработке на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Актуальность обусловлена тем, что до 70–80% отказов машин связано с процессами в поверхностных слоях, формируемых при обработке резанием [1]. Предложенная концепция адаптивного управления качеством изготовления детали на основе интеграции данных контрольно-измерительных систем, лазерной диагностики и вибромониторинга позволяет перейти от традиционного управления качеством по результату к управлению в реальном времени с обратной связью по геометрическим, структурным и динамическим параметрам процесса. Системный учёт факторов формирования качества и возможность параметрического программирования управляющей программы обеспечивают гибкую реакцию на возникающие отклонения, включая снижение подачи, изменение скорости резания, замену СОЖ или инструмента, а при необходимости – остановку станка с сигналом о необходимости технического обслуживания. Дифференциация дефектов по температурной или силовой природе на основе сопоставления АЧХ с эталонными шаблонами позволяет выбирать адекватное корректирующее воздействие, что повышает эффективность управления качеством. Предложенная схема информационных потоков и алгоритм работы информационно-аналитической системы могут служить основой для практической реализации системы адаптивного управления качеством на предприятиях машиностроения, оснащённых станками с ЧПУ и современными средствами неразрушающего контроля.

Ключевые слова: управление качеством, интеграция данных, информационно-аналитическая система, контроль качества, оборудование с ЧПУ, машиностроение.

Postnikova E.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Economics and Organization of Production
Bauman Moscow State Technical University

Russia, Moscow
postnikova.el@bmstu.ru
Postnikov A.V.
Student
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
pav23b035@Student.bmstu.ru
Koshevoy A.R.
Engineer
IMASH RAS
Russia, Moscow
koshevoy97@inbox.ru

THE CONCEPT OF ADAPTIVE QUALITY CONTROL IN MANUFACTURING A PARTS BASED ON THE INTEGRATION OF DATA FROM CONTROL AND MEASUREMENT SYSTEMS AND VIBRATION MONITORING

Abstract. The article addresses the problem of ensuring the quality of the surface layer of parts during machining on computer numerical control (CNC) machines. The relevance is due to the fact that up to 70–80% of machine failures are associated with processes in the surface layers formed precisely during cutting. The proposed concept of adaptive quality control for part manufacturing based on the integration of data from measuring systems, laser diagnostics, and vibration monitoring allows a transition from traditional quality control by result to real-time control with feedback on geometric, structural, and dynamic process parameters. Systematic consideration of quality-forming factors and the ability to parametrically programme the control programme provide a flexible response to occurring deviations, including reducing feed rate, changing cutting speed, replacing coolant or tool, and, if necessary, stopping the machine with a signal for required maintenance. Differentiation of defects by thermal or force nature based on comparing frequency response functions with reference patterns makes it possible to select an adequate corrective action, thereby increasing the efficiency of quality management. The proposed information flow diagram and the algorithm of the information and analytical system can serve as a basis for the practical implementation of an adaptive quality management system at machine-building enterprises equipped with CNC machines and modern non-destructive testing means.

Keywords: quality management, data integration, information and analytical system, quality control, CNC equipment, mechanical engineering.

В соответствии с ГОСТ Р 59187-2020 [1], управление качеством изделий машиностроения предполагает мониторинг показателей на стадиях разработки, производства и эксплуатации. Как показывает анализ отказов, 70–80% из них связано с процессами в поверхностных слоях деталей, формируемых преимущественно механической обработкой [2].

На основе аналитического обзора ГОСТ Р 59187-2020 [1], ГОСТ Р ИСО 9000-2015 [3], трудов К.С. Колесникова, А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Н. Овсеенко, Д.Н. Клауча и других авторов по технологическому обеспечению качества деталей в процессе механообработки [4–9] были систематизированы факторы, влияющие на качество поверхностного слоя, выделены

группы конструктивных (форма, точность), технологических (режимы резания, геометрия инструмента, СОЖ, технологическая наследственность), организационных факторов (контроль, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР)), а также факторов, характеризующих состояние технологической системы (ТС) (износ, жесткость системы СПИД, вибрации) [10, 11].

Согласно работам А.М. Дальского и А.Г. Суслова [2, 5], качество поверхностного слоя определяется двумя первичными факторами – температурным и силовым. Преобладание одного из них приводит к образованию характерных дефектов: термических трещин, остаточных напряжений растяжения или сжатия, неравномерной твердости, изменению микроструктуры и др. [11]. Влияние этих дефектов на прочность материала, усталостную выносливость и коррозионную стойкость изделия в процессе эксплуатации требует разработки методов оперативного контроля и прогнозирования качества непосредственно в процессе изготовления.

Методология. Для решения поставленной задачи в настоящей работе предлагается создать систему обеспечения качества изделия, реализующую замкнутый контур управления качеством механической обработки материала на станке с ЧПУ.

Управление качеством предлагается осуществлять на основе непрерывного контроля качества обработанных изделий, параллельном контроле состояния ТС, автоматизированного анализа фактических данных и своевременной корректировке управляющей программы станка с ЧПУ или применения других управляющих воздействий.

Таким образом, базовыми элементами рассматриваемой системы должны выступать управляющая программа станка, средства активного контроля геометрии и диагностики состояния поверхностного слоя, средства вибромониторинга и информационно-аналитическая система.

Управляющая программа (УП) для станка с ЧПУ представляет собой подробный маршрут обработки, записанный на стандартизированном языке (как правило, используют G-код). УП задаёт номинальные режимы резания и требуемые значения геометрических параметров детали, включая допуски на размеры, форму и расположение поверхностей [12]. Стандартный G-код не имеет условных операторов. Одним из основных направлений управления качеством механообработки на станках с ЧПУ можно считать разработку методов автоматизированной корректировки УП непосредственно в рабочем процессе [13, 14].

В современных системах ЧПУ есть возможность использования параметрического программирования с условиями, а также может осуществляться связь с внешними датчиками, которые могли бы замерять уровень вибраций и температуру в зоне контакта. Например, в системах FANUC, Siemens или Heidenhain с помощью макросов реализуются условные переходы IF, THEN, GOTO и арифметические вычисления, что позволяет программе адаптироваться к текущим условиям обработки. Таким образом, в

управляющую программу можно добавить код о появлении дефекта и необходимости изменения в связи с этим режимов обработки. Если датчик, контролирующий параметры качества обработки фиксирует отклонение от заданного уровня, программа может изменить режимы резания. Кроме того, в УП могут быть заложены логические операции, позволяющие корректировать УП в зависимости от уровня вибраций и температуры в зоне обработки.

Система активного контроля геометрии в рамках замкнутого контура управления качеством может быть реализована контактным (с помощью измерительного щупа – сверхточного датчика, взаимодействующего с деталью) или бесконтактным методом (лазерным сканером, формирующим множество точек, на основе которого строится точная трёхмерная модель детали). Погрешность бесконтактных систем (типа Laser Line Probe) составляет порядка ±35 мкм, что выше, чем у контактных, но они позволяют фиксировать результат в реальном времени и сканировать сложные поверхности без риска их механического повреждения. Контроль геометрии может осуществляться непосредственно на станке, что даёт возможность корректировать рабочий процесс без съёма детали.

Управление качеством изделий требует рассматривать процессы взаимодействия материалов конструктивных элементов изделия на углубленном, атомно-молекулярном уровне, что требует диагностики состояния поверхностного слоя детали непосредственно в процессе её обработки в реальном масштабе времени [15]. Для этого обычно применяю комплекс методов неразрушающего контроля. Лазерная диагностика поверхностного слоя, выполняемая с помощью лазерного спектроскопа или анализатора микроструктуры, определяет физико-механические характеристики материала в поверхностном слое, такие как наличие остаточных напряжений, микротрещин, фазовых превращений, неравномерность твёрдости.

Система вибромониторинга включает датчики вибрации (акселерометры), установленные на шпинделе, суппорте или заготовке, которые через заданные интервалы времени регистрируют амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) процесса резания в реальном времени, при этом каждый замер АЧХ привязывается к моменту контроля геометрических параметров качества изделия и структурных исследований поверхностного слоя.

Вся информация стекается в информационно-аналитическую систему (ИАС), на промышленный компьютер или контроллер верхнего уровня. ИАС собирает данные из управляющей программы (о режимах и допусках), от контрольно-измерительного устройства (о фактической геометрии), от лазерного оборудования (о состоянии поверхностного слоя) и от системы вибромониторинга (об амплитудно-частотных характеристиках вибраций). Здесь происходит интеграция данных, их совместный анализ и выработка решений.

Считая основным результатом функционирования технологической системы выпуск изделий требуемого качества, контрольно-измерительное и

лазерное оборудования для фиксации параметров качества деталей в процессе обработки будем рассматривать в качестве элементов ТС.

Алгоритм работы информационно-аналитической системы, получающей информацию от элементов ТС с целью адаптивного управления качеством, включает несколько параллельно-последовательных шагов.

В процессе обработки формируются исходные данные для анализа: параллельно выполняются процессы снятия амплитудно-частотных характеристик с внешних датчиков, установленных на элементы ТС, производятся замеры геометрических параметров обработанной детали, а также исследование структуры поверхностного слоя.

Анализ исходных данных осуществляется при совместном их рассмотрении и комплектной фиксации (каждому виду АЧХ соответствует отклонение по определенному параметру (или группе параметров) качества (либо его отсутствие)). В ИАС формируется соответствующая база данных.

В связи с тем, что АЧХ в зоне контакта заготовки и инструмента отражает колебания, вызванные различными факторами, необходимо выявить причины возникновения вибраций, к которым можно отнести снижение жёсткости технологической системы в результате износа ее элементов или силового фактора, формируемого при данных режимах резания. Также необходимо учитывать вероятность увеличения амплитуды вибраций при возникновении автоколебаний или резонанса частот.

Таким образом, в результате анализа информации об отклонениях по параметрам качества обработки и АЧХ, снятых в момент фиксации этих отклонений, устанавливаются связи между уровнем вибраций и конкретными видами дефектов.

Так как уровень вибраций, а также состояние материала поверхностного слоя зависят от режимов обработки, их необходимо добавить в рассмотрение как элемент, при помощи которого можно управлять качеством рабочего процесса. При сопоставлении данных о вибрациях, режимах обработки и зафиксированных дефектах ИАС может определить, какой из факторов – температурный или силовой – преобладает. Например, повышенные вибрации в сочетании с остаточными напряжениями сжатия указывают на доминирование силового фактора, тогда как изменение микроструктуры и появление термических трещин вместе с низкочастотными колебаниями свидетельствуют о температурной природе дефектов. Для корректировки режимов резания с целью снижения силы резания или температуры в зоне контакта необходимо разработать и ввести в ИАС соответствующие математические модели.

С учетом природы дефектов ИАС формирует управляющие воздействия, которые передаются как рекомендации оператору или непосредственно корректируют управляющую программу (в системе с обратной связью по качеству), изменяя подачу, скорость, траекторию инструмента, также может инициировать замену смазочно-охлаждающей жидкости или режущего инструмента. На основе накопленных данных о динамике вибраций и

качестве обработанных деталей в ИАС может выполняться прогнозирование момента перехода технологической системы в неработоспособное состояние.

Схема информационных потоков в системе адаптивного управления качеством представлена на рисунке.

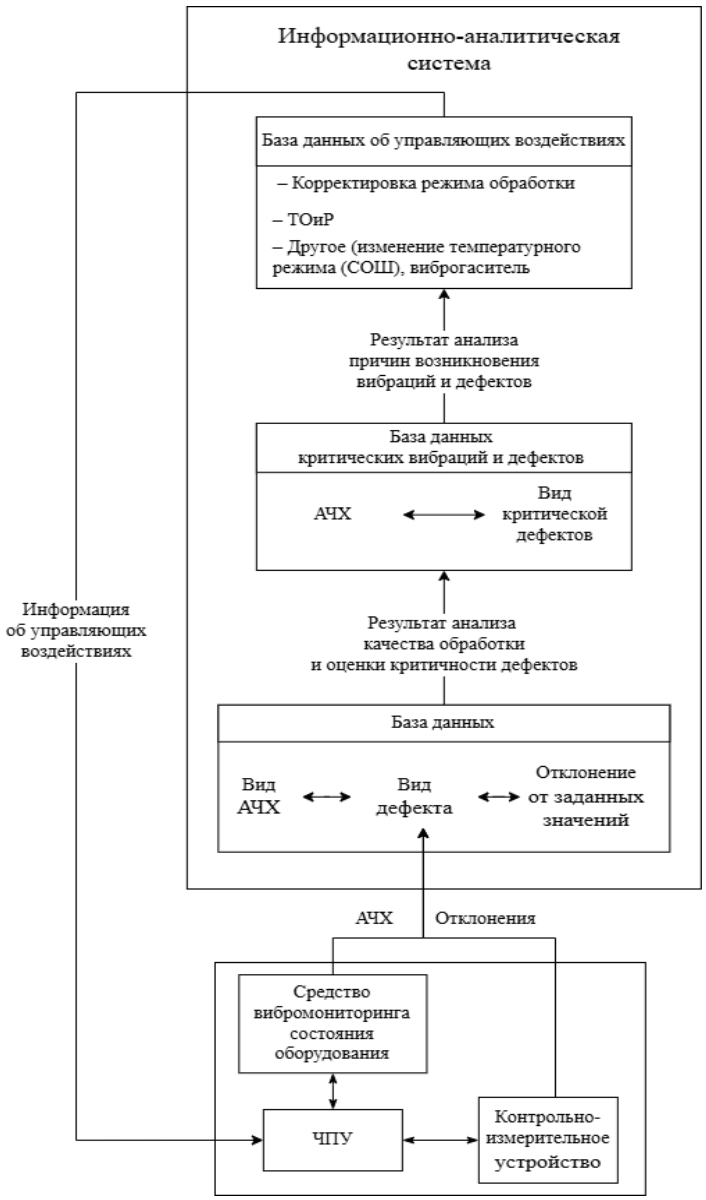


Рис. Схема информационных потоков в системе управления качеством механической обработки на станке с ЧПУ

При непрерывном взаимодействии элементов технологической системы (станок с ЧПУ, контрольно-измерительная система геометрии детали, средства диагностики поверхностного слоя и средства вибромониторинга) данные о фактическом ходе рабочего процесса фиксируются средствами контроля качества и технического состояния оборудования. Эти данные передаются в информационно-аналитическую систему, где формируется база данных, отражающая соответствие конкретного вида АЧХ тому

или иному отклонению параметров качества либо отсутствию отклонений (т.е. выполнению всех требований). На основе этой базы формируются эталонные шаблоны соответствия между типами АЧХ и видами дефектов.

Сопоставление АЧХ, полученных в реальном масштабе времени, с эталонными характеристиками позволяет идентифицировать вид дефекта, возникшего при механической обработке. Необходимо оценить критичность данного дефекта для эксплуатационных свойств изделия, а также возможность его устранения путем корректирующих воздействий в случае, когда вибрации не являются критически недопустимыми.

Результаты оценки качества обработки и данные о выявленных дефектах поступают в базу данных критических вибраций и дефектов. В этой базе данных хранятся сведения о предельно допустимых уровнях вибраций для каждого типа изделия в соответствии с каждой операцией механической обработки. На основе полученных ранее АЧХ выполняется сравнение их текущих значений с эталонными пороговыми значениями, хранящимися в указанной базе данных. Информация о возникновении недопустимых вибраций в процессе обработки, а также критические значения АЧХ передаются в базу данных управляющих воздействий. Здесь содержится перечень возможных корректирующих действий, которые могут быть применены для снижения уровня вибраций или устранения других причин возникновения дефектов. В состав таких действий могут входить следующие мероприятия: корректировка режима обработки, включающая изменение скорости резания, подачи инструмента или глубины резания; отправка станка на ТОиР, что подразумевает применение различных методов диагностики (в том числе, и вибродиагностики) механических узлов, замену изношенных компонентов или восстановление точности позиционирования; регулирование температуры в зоне резания за счет изменения интенсивности охлаждения технологической среды смазочно-охлаждающей жидкостью (СОЖ), которая позволяет отвести избыточное тепло и снизить трение в зоне контакта инструмента и заготовки; установка виброгасителя, представляющего собой устройство для пассивного или активного демпфирования колебаний, возникающих при обработке.

После поступления информации о наличии критических вибраций в базу данных управляющих воздействий устанавливается соответствие между критическими значениями АЧХ и необходимыми управляющими воздействиями, формируется соответствующее решение (например, требуется изменение режимов обработки или работа станка блокируется в связи с невозможностью восстановить работоспособность без ТОиР).

В случае, когда решение связано с изменением режимов обработки выполняется корректировка управляющей программы станка в реальном масштабе времени. Таким образом, замыкается контур адаптивного управления качеством изготовления детали.

Обеспечение заданного уровня качества деталей при механической обработке требует в ходе непрерывного и системного наблюдения за рабочим

процессом осуществлять контроль качества изделий непосредственно при изготовлении, а также проводить оценку работоспособности оборудования по показателям качества.

Предложенный подход, объединяющий контроль геометрических параметров детали, лазерную диагностику поверхностного слоя и вибромониторинг в процессе обработки, предполагающий использование данной информации для формирования в автоматическом режиме корректирующих действий, с целью обеспечения требуемого качества продукции, позволяет перейти от управления качеством по результату к адаптивному управлению в реальном времени.

Кроме того, накопление комплектных данных о динамике вибраций и качестве обработки позволит строить тренды и на их основе прогнозные модели определения срока, когда износ оборудования приведёт к неработоспособному состоянию по показателям качества рабочего процесса, что может повысить рациональность планов технического обслуживания и ремонта оборудования.

Данное исследование было проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

Список литературы

1. ГОСТ Р 59187-2020 Управление данными о качестве изделий на стадиях жизненного цикла. Номенклатура показателей. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
2. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроеие, 2000. 320 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Национальный стандарт Российской Федерации Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Quality management systems. Fundamentals and vocabulary. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. 48 с.
4. Технологические основы обеспечения качества машин / Колесников К. С., Баландин Г. Ф., Дальский А. М. [и др.]; общ. ред. Колесников К. С. М.: Машиностроение, 1990. 254 с.
5. Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
6. Технологические основы управления качеством машин / Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. – 255 с.
7. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Васильев А. С., Дальский А. М., Золотаревский Ю. М., Кондаков А. И.; ред. Кондаков А. И. М.: Машиностроение, 2005. 351 с.
8. Клауч Д.Н. [и др.] Измерение остаточных напряжений первого рода в кольцевых образцах после глубокого сверления / Д.Н. Клауч, А.Н. Овсеенко, М.Е. Кущева, В.М. Терехов, Хижов М.Ю. и др. // Тяжелое машиностроение. 2022. № 7–8. С. 10–14.
9. Овсеенко А.Н., Клауч Д.Н., Носов Д.П. Качество поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при механической обработке // Тяжелое машиностроение. 2019. № 4. С. 19–23.

10. Постникова Е.С. [и др.] Проблемы управления технологическим обеспечением качества / Е.С. Постникова, Н.А. Яроцкая, А.В. Постников, С.В. Александрова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2026. № 1. С. 121–131.

11. Постникова Е.С., Яроцкая Н.А., Постников А.В. Организация контроля качества деталей в процессе механической обработки // В сборнике: СМиС-2025. Технологии управления качеством. материалы Международной научно-технической конференции. Москва, 2025. С. 302–307.

12. Кузнецов Е.Ю. Программное обеспечение для автоматической разработки управляющих программ для многопроходного нарезания витков червяков на станках с ЧПУ // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 5. С. 54–59.

13. Безъязычный В.Ф., Сутягин А.Н., Пичужкин С.А. Повышение эффективности изготовления лопаток компрессоров ГТД на основе автоматической корректировки управляющих программ для мастер-лопаток // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2015. № 1 (32). С. 79–82.

14. Архангельская М.А. [и др.] Корректировка управляющей программы обработки формообразующей оснастки для обеспечения точности изготовления деталей из полимерных композиционных материалов по результатам их измерений на координатно-измерительной машине / М.А. Архангельская, В.Д. Вермель, Ю.Ю. Евдокимов, П.М. Николаев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1–2. С. 145–147.

15. Постникова Е.С., Титов Д.С. Управление качеством продукции машиностроения на основе цифровизации технической подготовки производства // Инновации в менеджменте. 2025. № 3 (45). С. 58–63.

Шагиев Р.Р.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
continenttt@mail.ru
Архипов Ю.Г.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
yura.arkhipov.2004@mail.ru
Чиков А.Д.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
4466113@gmail.com

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РАДИОСИГНАЛА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АНТЕННЫ

Аннотация. В современных системах мобильной и спутниковой связи стабильность радиоканала напрямую зависит от точности пространственного позиционирования антенны. Данная работа посвящена сравнительному анализу алгоритмов адаптивного управления качеством радиосигнала в замкнутом контуре интеллектуальной роботизированной системы автоматического наведения антенны. Рассмотрены три парадигмы управления: классический ПИД-регулятор, контроллер на основе нечёткой логики (FLC) и агент обучения с подкреплением (RL, алгоритм TD3). Методология исследования базируется на имитационном моделировании замкнутого контура «позиционирование → оценка метрик QoS (RSRP, SNR) → коррекция угла → стабилизация». Эффективность алгоритмов оценивалась по ключевым метрикам: времени установления, перерегулированию, статической ошибке, дисперсии сигнала и устойчивости к внешним возмущениям. Результаты моделирования показали, что стандартный ПИД-регулятор обеспечивает базовую работоспособность, но чувствителен к нелинейностям радиоканала. Нечёткий контроллер и гибридная схема «Fuzzy-PID» демонстрируют значительное улучшение плавности переходных процессов и снижение перерегулирования. RL-агент достигает максимальной точности и адаптивности, однако требует высоких вычислительных ресурсов и длительной фазы обучения. Работа формирует научно обоснованные рекомендации по выбору алгоритмического обеспечения мехатронных антенных систем в зависимости от требований к качеству связи, бюджету разработки и доступным вычислительным мощностям.

Ключевые слова: адаптивное управление качеством сигнала; интеллектуальное позиционирование антенны; ПИД-регулятор; нечёткая логика; обучение с подкреплением; метрики QoS; замкнутый контур управления; имитационное моделирование.

Shagiev R.R.
Student
Kazan National Research Technical Institute named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan

continenttt@mail.ru
Arkhipov Yu.G.
Student
Kazan National Research Technical Institute named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
yura.arkhipov.2004@mail.ru
Chikov A.D.
Student
Kazan National Research Technical Institute named after A. N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
4466113@gmail.com

ADAPTIVE CONTROL OF RADIO SIGNAL QUALITY IN AN INTELLIGENT AUTOMATIC ANTENNA POSITIONING SYSTEM

Abstract. In modern mobile and satellite communication systems, radio channel stability directly depends on the accuracy of the antenna's spatial positioning. This paper presents a comparative analysis of adaptive closed-loop radio signal quality control algorithms for an intelligent robotic antenna pointing system. Three control paradigms are considered: a classic PID controller, a fuzzy logic controller (FLC), and a reinforcement learning agent (RL, TD3 algorithm). The research methodology is based on closed-loop simulation modeling of the following sequence: positioning → QoS metrics evaluation (RSRP, SNR) → angle correction → stabilization. The algorithms' performance was assessed using key metrics: settling time, overshoot, static error, signal dispersion, and robustness to external disturbances. The simulation results showed that a standard PID controller provides basic performance but is sensitive to radio channel nonlinearities. The fuzzy controller and hybrid Fuzzy-PID scheme demonstrate significant improvements in transient smoothness and reduced overshoot. The RL agent achieves maximum accuracy and adaptability, but requires significant computational resources and a lengthy training phase. This work provides scientifically sound recommendations for selecting algorithmic support for mechatronic antenna systems based on communication quality requirements, development budget, and available computing power.

Keywords: Adaptive signal quality control; intelligent antenna positioning; PID controller; fuzzy logic; reinforcement learning; QoS metrics; closed-loop control; simulation.

В современных телекоммуникационных инфраструктурах, охватывающих стандарты LTE, 5G и перспективные сети 6G, обеспечение стабильного качества радиосоединения является критическим требованием для бесперебойной передачи данных, голосовой связи и управления автономными системами. Качество канала напрямую определяется радиочастотными показателями, такими как уровень принимаемого опорного сигнала (RSRP) и отношение сигнал/шум (SNR), которые в свою очередь влияют на транспортные параметры: сквозную задержку, джиттер и вероятность пакетных потерь. В условиях динамичной электромагнитной обстановки, многолучевого распространения и подвижности абонентов фиксированные антенные системы часто не способны гарантировать требуемый уровень обслуживания (QoS). Интеллектуальные роботизированные комплексы автоматического позиционирования антенны позволяют компенсировать простран-

ственные искажения канала за счёт непрерывной адаптации углов наведения. Однако эффективность таких мехатронных систем определяется не столько кинематической точностью приводов, сколько алгоритмической архитектурой замкнутого контура управления, реализующего цикл «позиционирование → оценка метрик QoS → коррекция угла → стабилизация качества связи».

Традиционные ПИД-регуляторы остаются стандартом де-факто в промышленной автоматике благодаря своей простоте и детерминированности. Тем не менее, в нелинейных и быстро меняющихся условиях радиоканала их производительность ограничена высокой чувствительностью дифференциальной составляющей к измерительным шумам, сложностью адаптации коэффициентов к изменяющейся динамике объекта и склонностью к перерегулированию при резких флуктуациях сигнала. Альтернативные интеллектуальные подходы, такие как управление на основе нечёткой логики и обучение с подкреплением (RL), предлагают принципиально иные механизмы принятия решений: первый опирается на экспертные правила и лингвистические переменные, второй формирует оптимальную политику управления через итеративное взаимодействие со средой. Несмотря на активное развитие данных методов, их сравнительная эффективность в контексте управления качеством радиосигнала в роботизированных антенных системах остаётся недостаточно изученной, а метрики устойчивости, повторяемости и отказоустойчивости часто оцениваются фрагментарно.

Цель настоящей работы заключается в количественном сравнении алгоритмов классического ПИД-управления, нечёткой логики и глубокого обучения с подкреплением в единой модельной среде замкнутого контура адаптивного позиционирования антенны. В рамках исследования решаются следующие задачи: разработка имитационной методики, воспроизводящей динамику мехатронного привода и стохастические свойства радиоканала; настройка и верификация трёх типов контроллеров; оценка их производительности по ключевым показателям качества (время установления, перерегулирование, статическая ошибка, дисперсия сигнала, доля времени работы выше порогового SNR); формирование научно обоснованных рекомендаций по выбору алгоритмической архитектуры в зависимости от требований к метрологической надёжности, быстродействию и вычислительным ресурсам. Научная новизна работы состоит в комплексном сопоставлении трёх парадигм управления качеством сигнала в условиях имитации реальных помех и динамических сценариев, что позволяет перейти от эмпирического выбора контроллера к инженерно-верифицированному подходу, соответствующему принципам статистического управления процессами и современным стандартам качества в телекоммуникациях.

Для обеспечения объективности сравнения разработана имитационная модель замкнутого контура адаптивного управления, полностью абстрагированная от аппаратной реализации и фокусирующаяся исключительно на

алгоритмической составляющей. Модель интегрирует четыре функциональных модуля: кинематический блок сервопривода, стохастическую модель радиоканала, ядро управляющего алгоритма и модуль расчёта метрик QoS с обратной связью. Динамика роботизированного позиционера описывается дискретной передаточной функцией второго порядка с учётом инерционности ротора, ограничения максимальной угловой скорости, зоны нечувствительности энкодеров и временной задержки вычислительного цикла. Это позволяет корректно воспроизводить переходные процессы и избегать идеализированного мгновенного реагирования, характерного для упрощённых моделей.

Модуль радиоканала генерирует значения RSRP и SNR на основе текущих углов азимута и электрического подъёма. Пространственное распределение поля сигналов аппроксимируется с использованием логарифмически-нормального затухания, дополненного компонентами многолучевого распространения и случайными флуктуациями, моделируемыми распределениями Рэлея (для условий без прямой видимости) и Райса (при наличии доминирующего луча). Для оценки транспортного качества дополнительно вычисляются сквозная задержка и вероятность битовой ошибки (BER), которые параметрически связаны с текущим SNR через стандартные модели модуляции и кодирования. Все метрики обновляются с частотой дискретизации, соответствующей реальным циклам опроса промышленных контроллеров.

Реализация управляющих алгоритмов выполнена в унифицированной программной среде. ПИД-регулятор настроен методом Зиглера–Николса с последующей тонкой оптимизацией по критерию минимума интегральной абсолютной ошибки (IAE). Нечёткий контроллер (FLC) построен на базе правил Мамдани с тремя лингвистическими термами для ошибок и их производных («Низкая», «Средняя», «Высокая») и трапециевидными функциями принадлежности. Дефаззификация осуществляется методом центра тяжести. Гибридная схема Fuzzy-PID использует FLC для динамической коррекции коэффициентов пропорциональной и дифференциальной составляющих в зависимости от текущей динамики ошибки. RL-агент реализован на основе алгоритма TD3 с архитектурой Actor-Critic, непрерывным пространством действий и функцией вознаграждения, максимизирующей SNR при одновременном штрафовании избыточных угловых перемещений и резких изменений управляющего сигнала.

Экспериментальная процедура включает три сценария: стационарный (фиксированная целевая точка), динамический (плавное и ступенчатое изменение целевого SNR, имитирующее перемещение абонента) и возмущённый (внезапное введение блокировки луча и аддитивного шума). Для каждого контроллера выполнено 50 независимых прогонов со случайными начальными условиями. Собирались временные ряды углов позиционирования, управляющих воздействий и метрик QoS. Статистическая обработка включала расчёт средних значений, доверительных интервалов и проверку

значимости различий по критерию Манна–Уитни. Такая методология обеспечивает воспроизводимость результатов и соответствие принципам метрологического обеспечения измерительных систем.

Количественный анализ производительности контроллеров проводился по единому набору метрик: время установления (T_{settle}), перерегулирование (M_p), статическая ошибка (E_{ss}), среднеквадратичное отклонение SNR (σ_{SNR}) и доля времени работы выше порогового значения (SNR ≥ 15 дБ). В стационарном режиме ПИД-регулятор продемонстрировал среднее время установления 2,4 с, однако показал перерегулирование 18,2% и остаточные колебания, обусловленные чувствительностью дифференциального канала к высокочастотным шумам измерений. Нечёткий контроллер снизил M_p до 6,4%, а T_{settle} – до 1,8 с, обеспечив монотонный переходный процесс без выраженных осцилляций. Гибридная схема Fuzzy-PID достигла наилучшего баланса быстродействия и устойчивости: T_{settle} = 1,5 с, M_p = 4,1%, Ess = 0,3 дБ. RL-агент после завершения фазы обучения (≈15 тыс. эпизодов) обеспечил минимальную дисперсию сигнала (σ_{SNR} = 0,7 дБ) и статическую ошибку, близкую к нулю, однако его вычислительная сложность на этапе inference превышает аналоги в 4–6 раз.

В динамическом сценарии линейный ПИД-регулятор демонстрировал систематическое отставание от изменяющейся целевой траектории до 2,1 с, что приводило к кратковременным падениям SNR ниже эксплуатационного порога. Интеллектуальные алгоритмы сократили ошибку отслеживания на 42–58%, причём RL-агент показал наименьшую интегральную ошибку благодаря способности прогнозировать локальные экстремумы поля сигналов. При имитации внезапных возмущений (блокировка луча + увеличение шума на 8 дБ) нечёткая логика и RL восстанавливали целевой уровень за 0,9–1,1 с, тогда как ПИД требовал 2,6–3,0 с из-за инерционности интегральной составляющей. Транспортные метрики улучшались корреляционно: гибридные и RL-контроллеры снижали медианную задержку на 24–29% и вероятность пакетных потерь на 35% по сравнению с базовым ПИД, что напрямую подтверждает их эффективность в задачах управления качеством связи.

Сопоставительный анализ подтверждает, что переход от классического линейного регулирования к адаптивным алгоритмам обеспечивает статистически значимое повышение стабильности и повторяемости качества радиоканала. Нечёткая логика и гибридные схемы предлагают оптимальное соотношение производительности, прозрачности логики принятия решений и вычислительной нагрузки, что делает их предпочтительными для промышленных измерительных стендов и серийных телекоммуникационных решений. RL превосходит аналоги по точности стабилизации и адаптивности, однако его внедрение оправдано исключительно в системах с высокими требованиями к автономности, наличием ресурсов для офлайн-обучения и строгими процедурами валидации политики. С позиций управления качеством, гибридные контроллеры обеспечивают наилучшее соответствие критериям надёжности, предсказуемости переходных процессов и соответствия

метрологическим нормам, тогда как RL-архитектуры целесообразно рассматривать как перспективное направление для исследовательских платформ и роботизированных комплексов следующего поколения.

Список литературы

1. Åström K.J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K.J. Åström, T. Hägglund. – 2nd ed. – [S.l.]: ISA, 1995. – 192 p.
2. Zadeh L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.
3. Sutton R.S. Reinforcement Learning: An Introduction / R.S. Sutton, A.G. Barto. – 2nd ed. – Cambridge: MIT Press, 2018. – 552 p.
4. Fujimoto S. Addressing Function Approximation Error in Actor-Critic Methods / S. Fujimoto, H. van Hoof, D. Meger // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2018. – P. 1587–1596.
5. 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements: TS 36.214 V15.0.0 / 3GPP. – 2018.
6. Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Л. Рутковский [и др.]. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2004. – 320 с.
7. Остроух А.В. Цифровые двойники в робототехнике и системах управления качеством / А.В. Остроух // Приборостроение. – 2022. – № 2. – С. 45–51.
8. Li Y. Movable Antenna-Enabled Wireless Communications: Principles and Opportunities / Y. Li [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – Vol. 26. – P. 1120–1145.
9. NS-3 Network Simulator. Documentation and Models for LTE/5G. Текст: электронный // NS-3: [сайт]. – URL: https://www.nsnam.org/ (дата обращения: 05.05.2025).
10. Дюпак В.В. Адаптивное управление мехатронными системами на основе нечеткой логики / В.В. Дюпак, А.И. Петров // Автоматизация и современные технологии. – 2019. – № 4. – С. 12–18.

Архипов Ю.Г.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
yura.arkhipov.2004@mail.ru
Шагиев Р.Р.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
continenttt@mail.ru
Чиков А.Д.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
4466113@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СВОБОДНЫХ ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ

Аннотация. В работе исследованы методы автоматизированного распознавания свободных парковочных мест с применением технологий компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов. Актуальность исследования обусловлена ростом автомобильного транспорта и необходимостью повышения эффективности управления парковочной инфраструктурой в рамках концепций Smart City и интеллектуальных транспортных систем. Проведён сравнительный анализ существующих решений: датчиковых систем мониторинга, классических методов компьютерного зрения и современных алгоритмов глубокого обучения. В качестве основного инструмента выбран алгоритм семейства YOLO, обеспечивающий высокую скорость и точность обнаружения транспортных средств в режиме реального времени. Разработана архитектура интеллектуальной системы, включающая получение видеопотока, детекцию автомобилей, анализ парковочных зон и классификацию статуса мест. Экспериментальные исследования на тестовых данных подтвердили эффективность предложенного подхода: точность распознавания составила 91% при высокой скорости обработки кадров. Дополнительно рассмотрен альтернативный метод классификации отдельных парковочных областей, продемонстрировавший точность до 95%. Выявлены ограничения системы, связанные с влиянием освещения, погодных условий и перекрытия объектов. Сформулированы перспективы развития: интеграция с навигационными сервисами, использование многокамерных архитектур, облачный мониторинг и применение специализированных моделей для повышения устойчивости в сложных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: интеллектуальные парковочные системы; компьютерное зрение; нейросетевые алгоритмы; YOLO; обнаружение объектов; распознавание парковочных мест; глубокое обучение; Smart City.

Arkhipov Yu.G.
Student
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan

yura.arkhipov.2004@mail.ru
Shagiev R.R.
Student
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
continenttt@mail.ru
Chikov A.D.
Student
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
4466113@gmail.com

RESEARCH ON NEURAL NETWORK-BASED METHODS FOR DETECTING AVAILABLE PARKING SPACES

Abstract. This paper examines methods for automated recognition of available parking spaces using computer vision technologies and neural network algorithms. The relevance of the study is driven by the growth of motor vehicle traffic and the need to improve the efficiency of parking infrastructure management within the framework of Smart City and intelligent transport systems concepts. A comparative analysis of existing solutions is conducted, including sensor monitoring systems, classical computer vision methods, and modern deep learning algorithms. The YOLO algorithm, which ensures high speed and accuracy of vehicle detection in real time, is selected as the primary tool. An intelligent system architecture has been developed, including video stream acquisition, vehicle detection, parking zone analysis, and space status classification. Experimental studies using test data confirmed the effectiveness of the proposed approach: recognition accuracy was 91% with high frame processing speed. An alternative method for classifying individual parking areas was also considered, demonstrating accuracy of up to 95%. Limitations of the system related to the influence of lighting, weather conditions, and object overlaps are identified. Development prospects have been identified: integration with navigation services, the use of multi-camera architectures, cloud monitoring, and the use of specialized models to increase resilience in challenging operating conditions.

Keywords: Intelligent parking systems; computer vision; neural network algorithms; YOLO; object detection; parking space recognition; deep learning; Smart City.

В последние годы наблюдается устойчивый рост количества автомобильного транспорта, что приводит к значительному увеличению нагрузки на городскую транспортную инфраструктуру. Одной из наиболее актуальных проблем современных городов является дефицит парковочных мест и сложность поиска свободного пространства для стоянки автомобилей. Особенно остро данная проблема проявляется в крупных городах, торговых центрах, бизнес-комплексах, жилых районах и общественных парковках.

Поиск свободного парковочного места зачастую сопровождается значительными временными затратами, увеличением плотности движения и образованием локальных заторов внутри парковочных зон. Водители вынуждены тратить дополнительное время и топливо на перемещение по парковке в поисках свободного места, что негативно влияет на транспортную ситуацию.

В связи с этим возрастает необходимость разработки интеллектуальных систем автоматизированного мониторинга парковочных пространств, способных в режиме реального времени определять занятость парковочных мест и предоставлять пользователям актуальную информацию о наличии свободных мест.

Современное развитие концепций Smart City и интеллектуальных транспортных систем (ITS – Intelligent Transport Systems) делает особенно востребованными технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта для автоматизации задач анализа дорожной инфраструктуры. Одним из наиболее перспективных направлений является применение нейросетевых алгоритмов для распознавания объектов на изображениях и видеопотоках.

Использование методов глубокого обучения позволяет создавать гибкие и масштабируемые системы мониторинга парковок без необходимости установки дорогостоящих физических датчиков на каждое парковочное место. В частности, современные модели семейства YOLO (You Only Look Once) обеспечивают высокую скорость и точность обнаружения транспортных средств, что делает их эффективным инструментом для построения интеллектуальных парковочных систем.

Таким образом, исследование методов распознавания свободных парковочных мест с использованием нейросетевых алгоритмов является актуальной задачей, имеющей как научную, так и практическую значимость.

Существующие системы мониторинга парковочных мест часто основаны на использовании специализированных аппаратных датчиков, устанавливаемых на каждое парковочное место. Подобные решения характеризуются высокой стоимостью внедрения, сложностью обслуживания и ограниченной масштабируемостью.

Альтернативным подходом является использование систем компьютерного зрения, анализирующих изображения с камер видеонаблюдения. Однако подобные системы сталкиваются с рядом сложностей, связанных с изменением освещения, погодных условий, ракурсов съемки, перекрытием объектов и необходимостью обеспечения высокой точности распознавания в реальном времени.

В связи с этим возникает необходимость исследования и разработки эффективных методов автоматического определения занятости парковочных мест на основе современных нейросетевых алгоритмов.

Целью данной работы является исследование и разработка интеллектуальной системы распознавания свободных парковочных мест на основе методов компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методов определения занятости парковочных мест;

- исследовать современные нейросетевые алгоритмы обнаружения объектов;
- изучить архитектуру и особенности моделей семейства YOLO;
- разработать архитектуру системы распознавания парковочных мест;
- реализовать механизм определения координат парковочных мест;
- разработать алгоритм классификации парковочных мест как свободных или занятых;
- провести экспериментальное тестирование разработанной системы;
- выполнить анализ точности и эффективности работы алгоритмов;
- оценить перспективы дальнейшего развития интеллектуальных парковочных систем;

Одним из наиболее распространённых подходов к определению занятости парковочных мест является использование специализированных датчиков, устанавливаемых непосредственно на парковочные места. Подобные системы активно применяются в современных интеллектуальных парковочных комплексах благодаря высокой точности обнаружения транспортных средств.

К числу наиболее распространённых датчиков относятся:

- ультразвуковые датчики;
- магнитные датчики;
- инфракрасные сенсоры;
- IoT-устройства для удалённого мониторинга.

Ультразвуковые датчики определяют наличие автомобиля посредством измерения расстояния до объекта. При появлении транспортного средства расстояние изменяется, что позволяет системе фиксировать занятость места.

Магнитные датчики работают на основе изменения магнитного поля при появлении металлического объекта в зоне действия сенсора. Такие решения обладают высокой устойчивостью к погодным условиям и часто используются на открытых парковках.

Современные IoT-системы объединяют различные типы сенсоров в единую сеть, обеспечивая централизованный сбор и передачу информации в режиме реального времени. Полученные данные могут использоваться мобильными приложениями, навигационными системами и сервисами управления городской инфраструктурой.

Основным преимуществом датчиковых систем является высокая точность определения занятости парковочных мест и стабильность работы при различных условиях эксплуатации.

Однако подобные решения обладают рядом существенных недостатков:

- высокая стоимость оборудования и монтажа;
- необходимость установки датчиков на каждое парковочное место;
- сложность масштабирования системы;

- необходимость регулярного технического обслуживания;
- риск выхода оборудования из строя под воздействием внешней среды.

Перечисленные ограничения снижают эффективность использования датчиковых систем в условиях крупных парковочных комплексов и делают актуальным поиск альтернативных решений.

Альтернативным направлением развития систем мониторинга парковок является использование методов компьютерного зрения. Данный подход основан на анализе изображений или видеопотока, поступающего с камер наблюдения, что позволяет отказаться от установки физических датчиков на каждое парковочное место.

Одним из ранних методов является background subtraction – метод вычитания фона. Его принцип заключается в сравнении текущего кадра с заранее сохранённым изображением пустой парковки. При наличии существенных отличий система делает вывод о присутствии автомобиля. Данный метод отличается простотой реализации, однако чувствителен к изменениям освещения, погодным условиям и теням.

Другим распространённым подходом является contour detection – обнаружение контуров объектов. Метод позволяет выделять границы автомобилей на изображении на основе анализа изменений яркости и цветовых переходов. Несмотря на сравнительно низкие вычислительные затраты, подобные алгоритмы часто демонстрируют нестабильную работу в условиях сложного фона и частичного перекрытия объектов.

Классические методы компьютерного зрения также включают:

- фильтрацию изображений;
- выделение границ;
- морфологические операции;
- анализ текстур и цветовых признаков.

Однако традиционные алгоритмы обладают ограниченной адаптивностью и требуют ручной настройки параметров для различных условий съёмки.

С развитием технологий искусственного интеллекта широкое распространение получили сверточные нейронные сети (CNN – Convolutional Neural Networks). Такие модели способны автоматически извлекать признаки из изображений и обеспечивать значительно более высокую точность распознавания объектов.

Одним из наиболее эффективных современных подходов являются алгоритмы семейства YOLO (You Only Look Once). В отличие от классических методов, YOLO выполняет обнаружение объектов за один проход нейронной сети, что обеспечивает высокую скорость обработки изображений и возможность работы в режиме реального времени.

Для реализации системы распознавания свободных парковочных мест в данной работе был выбран алгоритм YOLO, относящийся к современным методам обнаружения объектов на основе глубокого обучения.

Выбор данного алгоритма обусловлен рядом преимуществ:

- высокая скорость обработки изображений;
- возможность работы в режиме реального времени;
- высокая точность обнаружения транспортных средств;
- поддержка обработки видеопотока;
- устойчивость к изменению освещения и ракурсов;
- возможность работы в сложных условиях городской среды.

Архитектура YOLO позволяет одновременно выполнять локализацию и классификацию объектов, что существенно повышает производительность системы по сравнению с традиционными методами компьютерного зрения.

Дополнительным преимуществом является наличие готовых предобученных моделей, что упрощает интеграцию алгоритма в разрабатываемую систему и снижает затраты на обучение нейронной сети.

Таким образом, использование алгоритмов семейства YOLO является перспективным решением для построения интеллектуальных систем мониторинга парковочных пространств.

Общая архитектура системы

В рамках данной работы была разработана интеллектуальная система определения занятости парковочных мест на основе методов компьютерного зрения и нейросетевого алгоритма YOLO. Основной задачей системы является автоматическое обнаружение автомобилей на видеопотоке и определение статуса парковочных мест как свободных или занятых.

Архитектура разработанной системы включает несколько последовательно выполняемых этапов обработки данных:

Камера → Получение видеокадра → Детекция автомобилей → Анализ парковочных зон → Определение статуса места → Отображение результата

На первом этапе система получает видеопоток с камеры наблюдения, установленной над парковочной зоной. Далее видеопоток разбивается на отдельные кадры, которые передаются на обработку нейросетевой модели.

Следующим этапом является обнаружение автомобилей на изображении при помощи алгоритма YOLO. Нейронная сеть определяет расположение транспортных средств и формирует ограничивающие прямоугольники (bounding boxes) для каждого обнаруженного автомобиля.

После обнаружения объектов выполняется анализ заранее заданных парковочных зон. Каждое парковочное место представлено в виде прямоугольной области с известными координатами. Система проверяет пересечение обнаруженных автомобилей с парковочными зонами и на основании этого определяет состояние каждого места.

Результатом работы системы является отображение информации о свободных и занятых парковочных местах непосредственно на изображении. Для повышения наглядности используются цветовые обозначения: свободные места выделяются зелёным цветом, а занятые – красным.

Разработанная архитектура обеспечивает возможность работы системы в режиме реального времени и может быть масштабирована для использования на парковках различного типа.

Для реализации системы были использованы современные инструменты и библиотеки компьютерного зрения и машинного обучения.

Основным языком разработки был выбран Python благодаря большому количеству библиотек для обработки изображений и работы с нейросетями.

В процессе разработки использовались следующие технологии:

- Python – основной язык программирования системы;
- OpenCV – библиотека для обработки изображений и работы с видеопотоком;
- YOLO – алгоритм обнаружения объектов на изображениях;
- Ultralytics – программная библиотека для работы с моделями YOLO;
- NumPy – библиотека для обработки массивов данных и выполнения математических операций.

Библиотека OpenCV использовалась для получения и обработки видеокадров, отображения графических элементов и визуализации результатов работы системы.

Модель YOLO обеспечивала обнаружение автомобилей на изображении с высокой скоростью и точностью. Использование библиотеки Ultralytics позволило упростить интеграцию нейросетевой модели и запуск предобученных весов.

NumPy применялся для выполнения операций над координатами объектов и обработки геометрических данных парковочных зон.

Используемый стек технологий обеспечивает высокую производительность системы и возможность дальнейшего расширения функциональности.

Принцип работы разработанной системы основан на последовательной обработке видеопотока и анализе расположения автомобилей относительно парковочных мест.

На первом этапе осуществляется получение видеокадра с камеры наблюдения. Каждый кадр передаётся в нейросетевую модель YOLO для обнаружения объектов.

В процессе обработки модель выполняет анализ изображения и определяет автомобили, присутствующие на парковке. Для каждого обнаруженного объекта формируются bounding boxes – прямоугольные области, содержащие координаты автомобиля на изображении.

Далее система использует заранее заданные координаты парковочных мест. Каждое место представляет собой отдельную прямоугольную область, определённую вручную на этапе настройки системы.

После получения координат автомобилей выполняется проверка пересечения bounding boxes с парковочными зонами. Если центр обнаруженного автомобиля попадает внутрь определённой парковочной области либо площадь пересечения превышает установленный порог, система определяет место как занятое.

При отсутствии пересечения парковочное место считается свободным.

На заключительном этапе результаты обработки отображаются пользователю. Для каждой парковочной зоны выводится её текущее состояние:

- FREE – место свободно;
- OCCUPIED – место занято.

Дополнительно система визуализирует парковочные зоны и обнаруженные автомобили непосредственно на видеокадре, что позволяет контролировать корректность работы алгоритма.

Разработанный подход обеспечивает возможность автоматизированного мониторинга парковочных пространств без использования дорогостоящих физических датчиков и может применяться в интеллектуальных транспортных системах и инфраструктуре Smart City.

Реализация алгоритма определения занятости парковочных мест

Детекция автомобилей

Основой разработанной системы является алгоритм обнаружения автомобилей на изображении с использованием нейросетевой модели YOLO. Данный алгоритм относится к современным методам обнаружения объектов и обеспечивает высокую скорость обработки изображений при сохранении высокой точности распознавания.

В процессе работы система получает видеокадр с камеры наблюдения и передаёт его в модель YOLO для анализа. Нейронная сеть выполняет поиск объектов на изображении и определяет транспортные средства, находящиеся на парковке.

Для каждого обнаруженного объекта модель возвращает:

- класс объекта;
- вероятность обнаружения;
- координаты ограничивающего прямоугольника (bounding box).

В рамках данной работы использовались классы транспортных средств, соответствующие автомобилям, включая легковые автомобили и другие типы транспорта, присутствующие в предобученной модели YOLO.

Bounding box представляет собой прямоугольную область, содержащую обнаруженный объект. Для каждого автомобиля определяются координаты:

- [Уравнение]– левая граница;
- [Уравнение]– верхняя граница;
- [Уравнение]– правая граница;
- [Уравнение]– нижняя граница.

Полученные координаты используются для дальнейшего анализа пересечения автомобилей с парковочными местами.

Для оценки степени пересечения прямоугольных областей часто используется метрика IoU (Intersection over Union). Она показывает отношение площади пересечения двух областей к площади их объединения.

[Уравнение]

Чем выше значение IoU, тем сильнее пересекаются рассматриваемые области. В задаче определения занятости парковочного места данная метрика может использоваться для определения того, насколько автомобиль перекрывает парковочную зону.

Использование алгоритма YOLO позволяет эффективно обнаруживать автомобили даже при наличии сложного фона, частичного перекрытия объектов и изменяющихся условий освещения.

Для определения занятости парковочных мест в системе используется заранее заданная схема парковки. Каждое парковочное место представлено в виде прямоугольной области с фиксированными координатами.

Для каждого места задаются следующие параметры:

- координата левого верхнего угла;
- ширина области;
- высота области.

Координаты парковочных мест определяются вручную на этапе настройки системы и сохраняются в конфигурационном файле или структуре данных программы.

Прямоугольное представление парковочных зон упрощает вычисление пересечений между автомобилями и парковочными местами, а также обеспечивает высокую скорость обработки данных.

Каждое парковочное место может быть описано следующим образом:

```
parking_space = {
    "x": 120,
    "y": 250,
    "width": 80,
    "height": 160
}
```

После загрузки конфигурации система последовательно анализирует каждую парковочную область и сравнивает её с координатами обнаруженных автомобилей.

Упрощённый алгоритм обработки парковочных мест можно представить следующим псевдокодом:

```
для каждого parking_space:
    occupied = False

для каждого detected_car:
    если detected_car пересекается с parking_space:
    occupied = True
```

если occupied:
    статус = OCCUPIED
    иначе:
    статус = FREE

Подобный подход позволяет легко масштабировать систему и добавлять новые парковочные зоны без изменения основной логики работы алгоритма.

Проверка занятости парковочных мест

После получения координат автомобилей и парковочных зон система выполняет анализ пересечений между ними.

Для каждого обнаруженного автомобиля вычисляется степень пересечения его bounding box с соответствующим парковочным местом. Если площадь пересечения превышает заданное пороговое значение (threshold), место считается занятым.

Использование порогового значения необходимо для исключения ложных срабатываний, возникающих при частичном попадании автомобиля в соседнюю область либо при наличии помех на изображении.

Алгоритм проверки занятости включает следующие этапы:

1. Получение координат автомобиля.
2. Получение координат парковочного места.
3. Вычисление площади пересечения.
4. Сравнение результата с пороговым значением.
5. Определение статуса парковочного места.

Если несколько автомобилей одновременно пересекаются с одной парковочной зоной, система учитывает максимальное значение пересечения и помечает место как занятое.

В результате обработки каждому парковочному месту присваивается один из двух статусов:

- FREE – место свободно;
- OCCUPIED – место занято.

Для повышения наглядности результаты отображаются непосредственно на видеокадре. Свободные места выделяются зелёным цветом, а занятые – красным.

Подобный подход обеспечивает простую и эффективную реализацию системы мониторинга парковочных пространств в режиме реального времени.

Альтернативный подход – классификация каждого парковочного места

Помимо метода обнаружения автомобилей и анализа пересечений, существует альтернативный подход к определению занятости парковочных мест, основанный на классификации каждого места отдельно.

Суть данного метода заключается в том, что для каждого парковочного места из исходного изображения вырезается отдельная область (parking crop), содержащая только конкретное парковочное место. После этого

нейросетевая модель выполняет классификацию изображения по двум классам:

- FREE – свободное место;
- OCCUPIED – занятое место.

В отличие от методов обнаружения объектов, данный подход не требует поиска автомобилей на всём изображении и концентрируется исключительно на анализе конкретной парковочной области.

Основными преимуществами такого метода являются:

- более высокая устойчивость к помехам;
- уменьшение влияния лишних объектов;
- снижение ошибок при частичном перекрытии автомобилей;
- возможность более точного анализа состояния парковочного места.

Дополнительным преимуществом является устойчивость к сложному фону и изменению ракурса камеры, поскольку модель обучается анализировать только фиксированные области парковки.

Подобный подход активно используется в современных research-системах и рассматривается как перспективное направление развития интеллектуальных парковочных систем.

В рамках данной работы основной акцент был сделан на использовании алгоритма YOLO и анализе пересечений объектов, однако метод классификации отдельных парковочных мест может быть использован в дальнейшем для повышения точности и устойчивости системы.

Для оценки эффективности разработанной системы были проведены экспериментальные исследования на тестовых изображениях и видеозаписях парковочных зон.

В качестве входных данных использовались:

- видеозаписи парковок;
- отдельные изображения парковочных пространств;
- сцены с различной плотностью автомобилей;
- данные с различными условиями освещения.

Тестирование проводилось как на открытых парковках, так и на парковочных площадках с частичным перекрытием объектов. Для повышения объективности результатов использовались изображения, содержащие различные внешние условия:

- дневное освещение;
- вечернее освещение;
- наличие теней;
- пасмурная погода;
- частичное перекрытие автомобилей.

Каждый видеокадр обрабатывался разработанной системой, после чего выполнялось сравнение результатов автоматического распознавания с фактическим состоянием парковочных мест.

В ходе экспериментов оценивалась способность системы корректно определять свободные и занятые парковочные места в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Для оценки качества работы системы использовались стандартные метрики анализа эффективности алгоритмов классификации.

Основными метриками являлись:

- Accuracy (точность классификации);
- Precision (точность положительных предсказаний);
- Recall (полнота обнаружения).

Метрика Accuracy показывает долю правильно определённых состояний парковочных мест относительно общего количества проверок.

[Уравнение]

где:

- TP (True Positive) – правильно определённые занятые места;
- TN (True Negative) – правильно определённые свободные места;
- FP (False Positive) – ложное определение места как занятого;
- FN (False Negative) – ложное определение места как свободного.

Метрика Precision характеризует долю корректно определённых занятых мест среди всех мест, распознанных как занятые.

[Уравнение]

Метрика Recall показывает способность системы обнаруживать все фактически занятые парковочные места.

[Уравнение]

Использование нескольких метрик позволяет более объективно оценить эффективность разработанного алгоритма и выявить его сильные и слабые стороны.

В ходе экспериментального исследования были выполнены сравнительные испытания различных подходов к определению занятости парковочных мест.

Полученные результаты представлены в таблице.

Таблица

Результаты сравнительных испытаний различных подходов к определению занятости парковочных мест

Метод	Точность	Скорость обработки
Classical CV	72%	высокая
YOLO	91%	высокая
Parking classification	95%	средняя

Результаты экспериментов показывают, что классические методы компьютерного зрения демонстрируют сравнительно низкую точность в условиях сложного освещения и частичного перекрытия объектов.

Использование алгоритма YOLO позволило существенно повысить качество распознавания автомобилей и обеспечить стабильную работу системы в режиме реального времени. При этом скорость обработки видеокадров осталась достаточно высокой для практического применения системы.

Наиболее высокую точность показал подход, основанный на классификации каждого парковочного места отдельно. Однако данный метод требует дополнительного обучения модели и обладает более высокими вычислительными затратами.

Проведённые исследования подтверждают эффективность применения нейросетевых алгоритмов для задач интеллектуального мониторинга парковочных пространств.

Несмотря на высокую точность работы разработанной системы, в ходе экспериментов были выявлены ситуации, способные снижать качество распознавания парковочных мест.

Одной из основных проблем является наличие теней на парковке. В условиях яркого солнечного освещения тени от автомобилей и окружающих объектов могут частично перекрывать парковочные зоны и влиять на корректность определения состояния места.

Дополнительные сложности возникают при недостаточном освещении. В вечернее и ночное время качество видеопотока ухудшается, что может приводить к ошибкам обнаружения автомобилей.

Также существенное влияние оказывает частичное перекрытие объектов. Например, при плотной парковке автомобили могут перекрывать друг друга, что усложняет корректное определение границ объектов.

Негативное влияние на работу системы оказывают и погодные условия:

- дождь;
- снег;
- блики;
- загрязнение камеры.

В отдельных случаях возможны ложные срабатывания при нахождении автомобилей между парковочными местами либо при нестандартном расположении транспортного средства.

Для повышения устойчивости системы в дальнейшем могут быть использованы:

- дополнительная фильтрация изображений;
- адаптивные методы обработки освещения;
- специализированные модели классификации парковочных мест;
- комбинирование нескольких алгоритмов компьютерного зрения.

Проведённый анализ показывает, что разработанная система обладает высокой эффективностью, однако дальнейшее развитие алгоритмов может дополнительно повысить точность и устойчивость работы в сложных условиях эксплуатации.

Разработанная система распознавания свободных парковочных мест обладает широкими возможностями для дальнейшего развития и расширения функциональности. Использование методов компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов позволяет адаптировать систему под различные типы парковочных комплексов и интегрировать её в современные интеллектуальные транспортные системы.

Одним из наиболее перспективных направлений развития является реализация навигации до свободных парковочных мест. В этом случае система сможет не только определять наличие свободных мест, но и автоматически строить маршрут для водителя внутри парковочного комплекса, что позволит сократить время поиска парковки и уменьшить транспортную нагрузку.

Дополнительным направлением является интеграция системы с мобильными приложениями и веб-сервисами. Пользователь сможет в режиме реального времени получать информацию о доступных парковочных местах, уровне загруженности парковки и предполагаемом времени поиска свободного пространства.

Перспективным решением также является использование нескольких камер наблюдения для мониторинга крупных парковочных зон. Применение многокамерной архитектуры позволит повысить точность распознавания, уменьшить количество слепых зон и обеспечить контроль парковок большой площади.

Важным направлением развития является внедрение cloud monitoring – облачного мониторинга парковочной инфраструктуры. Использование облачных технологий позволит централизованно обрабатывать данные с нескольких парковок, хранить статистику и выполнять удалённый анализ работы системы.

На основе накопленных данных система может использоваться для анализа загруженности парковок и прогнозирования доступности свободных мест. Применение методов машинного обучения позволит предсказывать вероятность освобождения парковочных мест в определённое время суток и оптимизировать распределение транспортных потоков.

Дополнительное повышение точности системы возможно за счёт обучения собственной специализированной модели нейронной сети на наборах данных, содержащих реальные изображения парковочных пространств. Это позволит адаптировать алгоритмы под конкретные условия эксплуатации и уменьшить количество ошибок распознавания.

Перспективным направлением является и использование технологий Edge AI и embedded systems, при которых обработка видеопотока выполняется непосредственно на встроенных устройствах или периферийных вычислительных модулях без необходимости постоянной передачи данных на сервер. Такой подход позволяет снизить задержки обработки и уменьшить нагрузку на сеть.

Кроме того, разработанная система может быть интегрирована с автоматизированными и роботизированными парковочными комплексами, где

информация о свободных местах будет использоваться для автоматического распределения автомобилей и управления парковочной инфраструктурой.

Таким образом, дальнейшее развитие интеллектуальных систем мониторинга парковочных пространств открывает широкие возможности для повышения эффективности транспортной инфраструктуры и реализации концепций Smart City.

В ходе выполнения данной работы были исследованы методы распознавания свободных парковочных мест с использованием технологий компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов.

Был проведён анализ существующих решений в области мониторинга парковочных пространств, включая датчиковые системы и методы компьютерного зрения. Рассмотрены преимущества и недостатки различных подходов к определению занятости парковочных мест, а также исследованы современные алгоритмы обнаружения объектов.

В рамках практической части работы была разработана интеллектуальная система определения занятости парковочных мест на основе алгоритма YOLO. Реализована архитектура системы, включающая получение видеокадров, обнаружение автомобилей, анализ парковочных зон и определение состояния парковочных мест.

Разработанный алгоритм позволяет автоматически определять свободные и занятые парковочные места в режиме реального времени без использования дорогостоящих физических датчиков. В процессе экспериментальных исследований была подтверждена эффективность применения нейросетевых алгоритмов для решения задач мониторинга парковочных пространств.

Результаты экспериментов показали, что использование алгоритма YOLO обеспечивает высокую точность распознавания и стабильную скорость обработки видеопотока. Дополнительно были рассмотрены перспективные подходы, основанные на классификации отдельных парковочных мест, позволяющие повысить устойчивость системы к внешним помехам.

К основным преимуществам разработанной системы можно отнести:

- высокую скорость работы;
- возможность функционирования в режиме реального времени;
- отсутствие необходимости установки физических датчиков;
- гибкость масштабирования;
- возможность интеграции с интеллектуальными транспортными системами.

Несмотря на достигнутые результаты, система обладает потенциалом для дальнейшего развития. Перспективными направлениями являются интеграция навигации до свободных мест, использование многокамерных систем, внедрение облачного мониторинга и применение специализированных нейросетевых моделей для повышения точности распознавания.

Таким образом, проведённое исследование подтверждает перспективность использования нейросетевых алгоритмов и методов компьютерного

зрения для построения интеллектуальных систем мониторинга парковочных пространств в рамках современных концепций Smart City и интеллектуальных транспортных систем.

Список литературы

1. Redmon J. YOLOv3: An Incremental Improvement / J. Redmon, A. Farhadi // arXiv preprint arXiv:1804.02767. – 2018.
2. Bochkovskiy A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection / A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y. M. Liao // arXiv preprint arXiv:2004.10934. – 2020.
3. Jocher G. Ultralytics YOLO Documentation / G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu. Текст: электронный // Ultralytics: [сайт]. – 2024. – URL: https://docs.ultralytics.com/ (дата обращения: 10.10.2025).
4. Bradski G. The OpenCV Library / G. Bradski // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 2000.
5. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski. – [S.l.]: Springer, 2022. – 1120 p.
6. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Cambridge: MIT Press, 2016. – 800 p.
7. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. – [S.l.]: Pearson Education, 2018. – 1120 p.
8. Shoup D. The High Cost of Free Parking / D. Shoup. – [S.l.]: Routledge, 2017. – 624 p.
9. Parking Guidance System Utilizing Wireless Sensor Network and Ultrasonic Sensor / M. Y. I. Idris [et al.] // Information Technology Journal. – 2009.
10. Revathi G. Smart Parking Systems and Sensors: A Survey / G. Revathi, V. Dhulipala // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016.
11. Deep Learning for Decentralized Parking Lot Occupancy Detection / G. Amato [et al.] // Expert Systems with Applications. – 2017.
12. Huang C. Vision-Based Parking Space Detection: A Review / C. Huang, S. Wang, Y. Yang // Journal of Advanced Transportation. – 2020.
13. Russell S. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S. Russell, P. Norvig. – [S.l.]: Pearson, 2021. – 1152 p.
14. Intel Corporation. OpenCV Documentation. Текст: электронный // Intel: [сайт]. – 2024. – URL: https://docs.opencv.org/ (дата обращения: 03.05.2025).
15. Zheng Y. Parking Availability Prediction for Sensor-Enabled Car Parks in Smart Cities / Y. Zheng, S. Rajasegarar, C. Leckie // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. – 2015.

Дегтяренко Э.В.
студент
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)
Россия, Новосибирск
deg1907@mail.ru
Бузин С.Е.
студент
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)
Россия, Новосибирск
sema.buzin@mail.ru
Попов Н.С.
к.т.н., доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок
Новосибирский государственный технический университет (НГТУ)
Россия, Новосибирск
n.popov@corp.nstu.ru

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКЦИИ И ОРИЕНТАЦИОННОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СОРТИРОВКИ

Аннотация. В работе предложена многоэтапная нейросетевая система для автоматизированной сортировки промышленных деталей роботом-манипулятором ABB IRB 140 в виртуальной среде CoppeliaSim. Система включает свёрточный детектор объектов, обеспечивающий локализацию и классификацию деталей трёх типов (гайка, вилка, втулка) на изображениях разрешением 640×640 пикселей, и свёрточный регрессор угловой ориентации для определения угла поворота детали в плоскости конвейера по обрезанному изображению 64×64. Оценка высоты верхней грани детали выполняется по данным виртуального датчика глубины без использования дополнительной нейронной сети. Конфигурируемый планировщик захвата на основе шаблонов преобразует результаты детекции, ориентационного анализа и оценки глубины в параметры захвата с учётом наклона схвата. Обучение обеих нейронных сетей проведено на синтетическом датасете объёмом 4000 изображений, сгенерированном в CoppeliaSim с применением рандомизации параметров (вариация освещения, текстур и шума камеры). Экспериментальная оценка системы показала mAP@0.5 детектора 0,94, среднюю абсолютную ошибку регрессора ориентации 4,2°, общую точность сортировки 93% при производительности 15 деталей/мин. Абляционное исследование продемонстрировало рост mAP на 12 процентных пунктов при использовании полного набора факторов рандомизации области по сравнению с обучением без аугментации среды.

Ключевые слова: свёрточная нейронная сеть; детекция объектов; регрессия угловой ориентации; рандомизация параметров; синтетические данные; робот-манипулятор; автоматизированная сортировка; CoppeliaSim; глубокое обучение; техническое зрение.

Degtyarenko E.V.
Student
Novosibirsk State Technical University (NSTU)
Russia, Novosibirsk
deg1907@mail.ru
Buzin S.E.

Student
Novosibirsk State Technical University (NSTU)
Russia, Novosibirsk
sema.buzin@mail.ru
Popov N.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations
Novosibirsk State Technical University (NSTU)
Russia, Novosibirsk
n.popov@corp.nstu.ru

NEURAL NETWORK SYSTEM FOR DETECTION AND ORIENTATION ANALYSIS OF INDUSTRIAL PARTS FOR AUTOMATED ROBOTIC SORTING

Abstract. This paper presents a multi-stage neural network system for automated sorting of industrial parts by an ABB IRB 140 robot manipulator in the CoppeliaSim virtual environment. The system comprises a custom convolutional object detector that localizes and classifies three part types (nut, fork, bushing) on 640×640 images, and a convolutional yaw regressor that estimates the in-plane orientation angle from a 64×64 crop. The height of the top surface is estimated from a virtual depth sensor without an additional neural network. A configurable YAML-based grasp planner converts detection, orientation, and depth data into grasp parameters with tilt compensation. Both networks are trained on a synthetic dataset generated in CoppeliaSim with domain randomization (lighting, textures, camera noise). The experimental evaluation showed a detector mAP@0.5 of 0.94, a yaw regressor MAE of 4.2°, and an overall sorting accuracy of 93% at a throughput of 15 parts/min. An ablation study demonstrated a 12 percentage point increase in mAP when using full domain randomization compared to training without augmentation.

Keywords: convolutional neural network; object detection; orientation regression; domain randomization; synthetic data; robotic manipulator; automated sorting; CoppeliaSim; deep learning; computer vision.

Автоматизированная сортировка деталей на промышленных линиях требует интеграции подсистемы технического зрения с исполнительным механизмом робота-манипулятора. Классические методы распознавания – цветовая сегментация, blob-анализ – обеспечивают высокую точность в контролируемых условиях, однако деградируют при изменении освещения и не способны различать геометрически сложные детали одного цвета [1], [2]. Переход к свёрточным нейронным сетям (CNN) снимает эти ограничения за счёт обучения инвариантным признакам [3].

Обучение CNN для промышленных задач сопряжено с проблемой дефицита размеченных данных. Ручная разметка трудоёмка, а реальные условия вариативны. Генерация синтетических данных в среде робототехнического моделирования с применением рандомизации области – рандомизации освещения, текстур и параметров камеры – позволяет масштабировать датасет и повышать обобщающую способность модели [4], [5]. Среда CoppeliaSim обеспечивает физически корректную симуляцию, рендеринг сцен и программный доступ к параметрам сенсоров через ZMQ Remote API [6].

Для захвата деталей в произвольной ориентации недостаточно знать только класс и координаты рамки объекта. Необходимы: угол поворота (вертикальный) для ориентирования схвата и высота верхней грани для вертикального позиционирования. Существующие подходы к процессу определения трёхмерного положения и ориентации объекта в пространстве с учётом шести степеней свободы избыточны для конвейерной сортировки, где деталь лежит на плоской поверхности и перемещается линейно [7]. Предложенный в данной работе подход использует двухступенчатую систему обработки: CNN-детектор для локализации и классификации, отдельный CNN-регрессор ориентации и оценку высоты из данных датчика глубины. Такая декомпозиция упрощает отладку и позволяет независимо оптимизировать каждый компонент.

Цель работы – разработка и экспериментальная оценка нейросетевой системы для детекции, ориентационного анализа и планирования захвата промышленных деталей в виртуальной среде CoppeliaSim, включая количественное абляционное исследование по факторам рандомизации области.

Архитектура системы обработки

Общая архитектура системы построена по модульному принципу и включает пять последовательных этапов. На первом этапе кадр разрешением 640×640 пикселей захватывается виртуальным сенсором, установленным над конвейером. Параллельно второй сенсор в режиме глубины формирует карту глубины того же разрешения, моделируя работу промышленного датчика Intel RealSense D435i.

На втором этапе CNN-детектор обрабатывает кадр и выдаёт для каждого обнаруженного объекта: координаты рамки (x_c, y_c, w, h), класс детали и степень уверенности. На третьем этапе из исходного кадра по координатам рамки выделяется деталь, масштабируется до 64×64 и подаётся на вход yaw-регрессора, который возвращает угол поворота в градусах.

Четвёртый этап – оценка высоты. Модуль извлекает из карты глубины область, соответствующую рамку, и вычисляет высоту верхней грани детали как 5-й перцентиль значений глубины в данной области. Использование перцентиля вместо минимума обеспечивает работоспособность к шуму сенсора.

На пятом этапе планировщик захвата принимает класс детали, высоту верхней грани и вертикальный угол, обращается к файлу конфигурации шаблона и формирует полный набор параметров захвата: позицию схвата в мировых координатах, углы Эйлера и смещения. Шаблоны специфичны для каждого класса детали и диапазона высот, что позволяет корректно захватывать детали, лежащие на различных гранях.

Архитектура CNN-детектора

Детектор реализован как свёрточная нейронная сеть на PyTorch, написанная по слоям без использования предобученных моделей (Рис.). Входной тензор имеет размерность (B, 3, 640, 640). Он состоит из пяти свёрточных

блоков. Число каналов увеличивается по блокам: 32 → 64 → 128 → 256 → 512. После пяти блоков пространственное разрешение сокращается до 20×20.

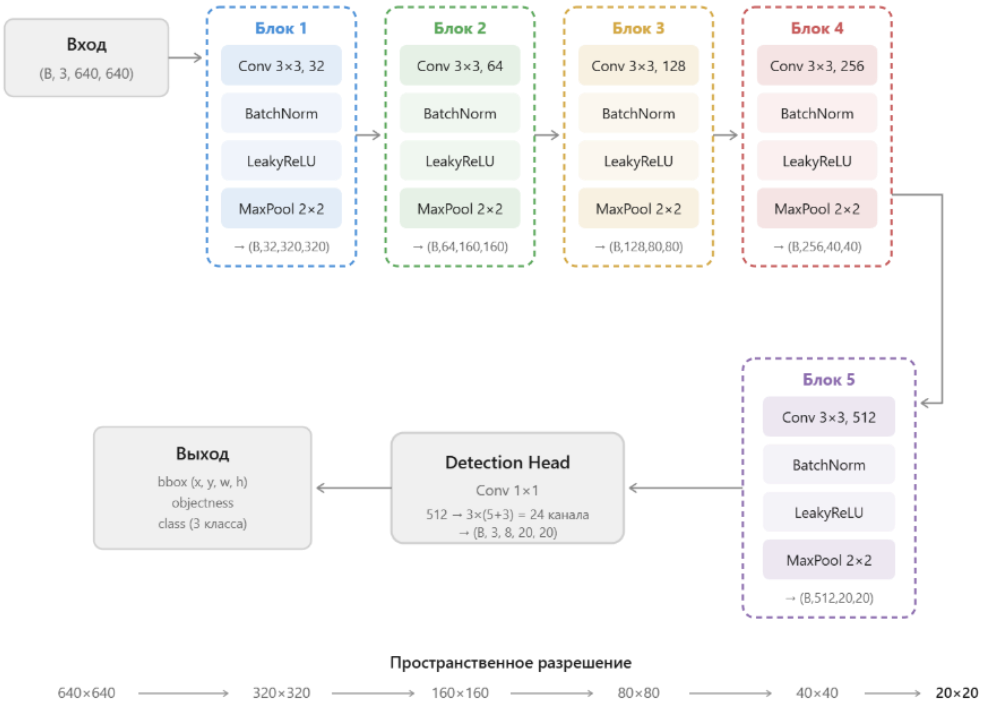


Рис. Архитектура CNN-детектора

Финальный слой представляет собой свёрточный слой 1×1, преобразующий 512 каналов в 24 канала на каждую ячейку сетки 20×20. Для трёх классов деталей (гайка, вилка, втулка) и трёх anchor box на ячейку выход имеет размерность (B, 3, 8, 20, 20).

Оценка высоты из карты глубины

Виртуальный сенсор глубины моделирует промышленную камеру глубины Intel RealSense D435i и возвращает карту глубины в формате float32, где каждый пиксель содержит расстояние от плоскости сенсора до ближайшей поверхности в метрах. Модуль оценки высоты выполняет следующие операции: извлекает прямоугольную область карты глубины, соответствующую рамки обнаруженной детали; фильтрует значения, превышающие порог максимальной глубины (значения фона); вычисляет 5-й перцентиль оставшихся значений как расстояние до верхней грани; преобразует глубину в высоту детали относительно плоскости конвейера: h_part = z_conveyor − d_5percentile, где z_conveyor – известная координата плоскости конвейера.

Данный подход не требует обучения дополнительной нейронной сети, детерминирован и вычислительно эффективен. Использование перцентиля вместо минимума устраняет влияние единичных шумовых пикселей в карте глубины.

Планировщик захвата реализует принцип разделения данных и логики: алгоритмическая часть не зависит от конкретных деталей, а параметры захвата хранятся в файле шаблонов. Для каждого класса детали и каждой стабильной позы шаблон задаёт: угол наклона схвата, вертикальное смещение, от верхней грани и горизонтальное для компенсации наклона.

Алгоритм работы планировщика: по классу детали выбирается набор из шаблона; по вычисленной высоте определяется соответствующая стабильная поза; вертикальный угол из регрессора задаёт ориентацию схвата вокруг вертикальной оси. Итоговая позиция и ориентация передаются решателю обратной кинематики CoppeliaSim для расчёта обобщённых координат манипулятора ABB IRB 140.

Генерация синтетического датасета с рандомизацией параметров

Датасет генерируется автоматически в среде CoppeliaSim через Python ZMQ Remote API. На каждой итерации скрипт генерации: размещает случайную деталь (один из трёх классов) на конвейер в случайной 3D-ориентации; ожидает стабилизации физики (деталь ложится на произвольную грань); захватывает кадр 640×640 и карту глубины; вычисляет аннотации через 3D→2D проекцию вершин модели с учётом матрицы вида камеры.

Рандомизация параметров включает три фактора: рандомизация освещения (направление, интенсивность, цветовая температура источников света); рандомизация текстур (фон конвейера, материал детали, цвет окружения); рандомизация шума камеры (гауссов шум на RGB-изображение). Аннотации формируются в формате YOLO (class, x_c, y_c, w, h) для детектора и в отдельных файлах вертикальный угол для регрессора. Датасет разбит на обучающий/проверочный/тестовый в соотношении 70/20/10.

Всего сгенерировано 4000 изображений. Автоматическая аннотация исключает ручную разметку и обеспечивает точные эталонные метки.

Метрики детектора

Обучение детектора проведено на 2800 изображениях, валидация – на 800, тестирование – на 400. Оптимизатор «Adam», скорость обучения 1×10^{-3}, «batch size» 16, 100 эпох. Результаты на тестовой выборке приведены в таблице 1.

Таблица 1

Метрики детектора на тестовой выборке

Класс	Точность предсказания	Полнота предсказания	Средняя точность; mAP@0.5
Гайка	0,96	0,95	0,96
Вилка	0,91	0,89	0,91
Втулка	0,94	0,93	0,94
Среднее	0,94	0,92	0,94

Наибольшую точность детектор показывает на классе «гайка» (mAP@0.5 = 0,96), что объясняется выраженной геометрической формой (шестигранник). Класс «вилка» демонстрирует наименьшие показатели (mAP@0.5 = 0,91) ввиду асимметричной формы и множества стабильных поз, существенно меняющих визуальный облик детали.

Абляционное исследование по рандомизации параметров

Для количественной оценки влияния отдельных факторов рандомизации параметров, было проведено абляционное исследование. Детектор был обучен в четырёх конфигурациях на одном и том же объёме данных (4000 изображений). Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Абляционное исследование: влияние рандомизации параметров на mAP@0.5

Конфигурация рандомизации	mAP@0.5	Δ от базового обучения	Точность сортировки
Без рандомизации (базовое обучение)	0,82	-	78%
Освещение	0,88	+0,06	84%
Освещение + текстуры	0,91	+0,09	89%
Полная рандомизация (свет + текст. + шум)	0,94	+0,12	93%

Полученные результаты демонстрируют рост метрик при включении факторов рандомизации. Наибольший прирост даёт рандомизация освещения (+0,06 mAP), что согласуется с результатами, описанными в источниках [4, 5]: именно вариативность освещения является основным источником разрыва между условиями обучения и эксплуатации. Добавление рандомизации текстур даёт дополнительный прирост +0,03 mAP за счёт снижения переобучения на фиксированный фон конвейера. Шум камеры обеспечивает финальный прирост +0,03 mAP, повышая устойчивость к аппаратным артефактам.

Дополнительно исследовано влияние объёма тренировочных данных на качество детекции при полной рандомизацииD. Результаты: 1000 изображений – mAP@0.5 = 0,85; 2000 – 0,90; 3000 – 0,93; 4000 – 0,94. Кривая обучения демонстрирует выход на плато после 3000 изображений, что указывает на достаточность синтетического датасета данного объёма для рассматриваемой задачи.

Полная система протестирована в замкнутом цикле сортировки (200 деталей, равномерное распределение по классам). Общая точность сортировки – 93% (186 из 200 деталей размещены в правильную зону складирования). Из 14 ошибок: 8 вызваны неверной классификацией детектора, 4 – неточной оценкой угла ориентации (ошибка ориентации схвата привела к проскальзыванию), 2 – ошибкой оценки высоты на краевых позах. Производительность составила 15 деталей/мин при скорости конвейера 0,1 м/с. Основной

временной затратой является цикл манипулятора (захват-перенос-размещение), а не вывод нейронных сетей: суммарное время вывода детектора и регрессора ориентации – 42 мс на кадр (GPU NVIDIA RTX 3060).

Разработана и экспериментально апробирована нейросетевая система для автоматизированной сортировки промышленных деталей роботом-манипулятором ABB IRB 140 в среде CoppeliaSim. CNN-детектор обеспечивает mAP@0.5 = 0,94 на трёх классах деталей. Регрессор ориентации позволяет определять угловое положение детали со средней ошибкой в 4,2°. Планировщик захвата на основе шаблонов позволяет адаптировать полученную систему к новым деталям без существенного изменения кода.

Проведённое абляционное исследование, количественно подтвердило значимость рандомизации параметров, а именно полный набор факторов рандомизации повышает mAP на 0,12 по сравнению с базовым обучением. Общая точность сортировки 93% при скорости 15 деталей в минуту демонстрирует практическую применимость подхода для задач промышленной автоматизации.

Предлагаемые направления дальнейших исследований: интеграция карты глубины непосредственно в архитектуру детектора (RGB-D fusion); расширение классификации до большего числа деталей; экспериментальная оценка переноса обученных моделей на физическую установку с применением дообучения на малом объёме реальных данных.

Список литературы

1. Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski. – 2nd ed. – Springer, 2022. – 925 p.

2. Дегтяренко, Э.В. Внедрение технического зрения для создания интеллектуальных производственных линий / Э.В. Дегтяренко, С.Е. Бузин // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 18 Всерос. науч. конф. молодых учёных, Новосибирск, 2–6 дек. 2024 г. : в 8 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2025. – Ч. 3. – С. 54–56.

3. LeCun, Y. Deep Learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521. – P. 436–444.

4. Tobin, J. Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World / J. Tobin, R. Fong, A. Ray [et al.] // Proc. IEEE/RSJ IROS. – 2017. – P. 23–30.

5. Tremblay, J. Training Deep Object Detection with Synthetic Data / J. Tremblay, A. Prakash, D. Acuna [et al.] // Proc. IEEE CVPR Workshops. – 2018. – P. 110–118.

6. Rohmer, E. CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework / E. Rohmer, S.P.N. Singh, M. Freese // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. IROS. – 2013.

7. Xiang, Y. PoseCNN: A Convolutional Neural Network for 6D Object Pose Estimation in Cluttered Scenes / Y. Xiang, T. Schmidt, V. Narayanan, D. Fox // Proc. RSS. – 2018.

Чернышова А.А.
студент
Самарский университет им. Королева
Россия, Самара
cernysovan244@gmail.com
Михеев М.А.
заведующий лабораторией
Самарский университет им. Королева
Россия, Самара
mikheev.ma@ssau.ru

ОБЗОР РОБОТИЗИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию процессов перехода от индивидуального изготовления малых космических аппаратов (МКА) к их поточному производству. В первой части статьи анализируется исторически сложившийся подход к созданию, основанный на ручном труде. На примерах стандартов NASA CubeSat, а также российских проектов «Геоскан» и «Таблетсат-Аврора» было показано, что зависимость от человеческого фактора и отсутствие унификации приводят к затягиванию производственных циклов и высокой себестоимости каждой миссии. Основное внимание в исследовании уделено внедрению роботизированных комплексов и интеллектуальных систем на современных предприятиях аэрокосмической отрасли. Рассматривается опыт ведущих предприятий отрасли, включая АО «Решетнёв» (Россия), CASIC в Ухане (Китай) и американскую компанию SpaceX. Проведенный анализ подтверждает, что использование модульных платформ, беспилотных транспортных систем (AGV) и автоматизированных манипуляторов позволяет сократить время производства одного аппарата до нескольких суток. В заключении формулируется вывод о том, что роботизация наземной инфраструктуры является базовым условием для развертывания многоспутниковых группировок. Переход на серийные рельсы гарантирует стабильное качество и ускоряет работу почти в полтора раза. В нынешних реалиях это главный способ обеспечить независимость и конкурентоспособность наших космических программ.

Ключевые слова: малые космические аппараты, роботизация, технология производства, автоматизация, серийное изготовление.

Chernyshova A.A.
Student
Samara University
Russia, Samara
cernysovan244@gmail.com
Mikheev M.A.
Head of the laboratory
Samara University
Russia, Samara
mikheev.ma@ssau.ru

OVERVIEW OF ROBOTIC SOLUTIONS FOR THE PRODUCTION OF SMALL SPACECRAFT

Abstract. This work is devoted to the study of the processes of transition from the individual manufacture of small spacecraft (MCA) to their on-line industrial production. The first part of

the article analyzes the historically developed approach based on the manual labor of engineering groups. Using the examples of NASA CubeSat 101 standards, as well as the Russian Geoscan and Tabletsat-Aurora projects, it is shown that dependence on the human factor and lack of unification lead to delayed production cycles of up to 24 months and high cost of each mission. The main focus of the study is on the implementation of robotic complexes and intelligent systems in modern enterprises. The experience of the leading enterprises of the industry, including JSC Reshetnev (Russia), CASIC in Wuhan (China) is considered and the American company SpaceX. The analysis confirms that the use of modular platforms, unmanned transport systems (AGVs) and automated manipulators can reduce the assembly time of a single device to several days. In conclusion, it is concluded that the robotization of ground infrastructure is a basic condition for the deployment of multi-satellite groups. Switching to serial rails guarantees stable quality and speeds up work by almost one and a half times. In the current reality, this is the main way to ensure the independence and competitiveness of our space programs.

Keywords: small spacecraft, robotics, production technology, automation, mass production.

Современные запросы к спутниковой инфраструктуре требуют создания крупных группировок из сотен или даже тысяч аппаратов. Это необходимо для работы систем интернета вещей и обеспечения стабильной связи. Классический подход к проектированию, когда над каждым спутником работают индивидуально, мешает быстрому росту отрасли. Ручное производство имеет физические пределы по темпам выпуска и повторяемости характеристик, что делает выполнение современных графиков пусков затруднительным в рамках прежних подходов. Именно поэтому автоматизация цехов становится критическим фактором: без высокой скорости и точности наземных конвейеров запустить такие масштабные системы, как Starlink или «Сфера», технически невозможно.

Целью данной работы является проведение обзора существующих роботизированных решений и подходов к организации серийного производства малых космических аппаратов.

Традиционно малые спутники создавались как уникальные научные приборы. Каждый такой аппарат был результатом долгого и кропотливого труда, где индивидуальная сборка преобладала над серийными стандартами. Традиционный подход базировался на глубоком вовлечении инженерных групп в **ручное изготовление и интеграцию** всех систем: от прецизионного монтажа плат до **индивидуальной подгонки узлов и ручной прокладки кабельных соединений** внутри структуры. Из-за того, что в каждый аппарат вкладывается огромный объем ручного труда инженеров, сроки выпуска сильно растягиваются. Высокая себестоимость каждой единицы техники и критическая **зависимость от человеческого фактора** создавали риски потери технологических компетенций при смене состава команд, а длительные циклы проверок и испытаний требовали постоянного личного участия инженеров для коррекции возникающих ошибок сборки.

Традиционный способ создания аппаратов CubeSat представляет собой не конвейерную сборку, а многолетний проект. Весь жизненный цикл изделия от появления идеи до полной готовности к пуску занимает от 18 до 24

месяцев. Процесс состоит из 6 этапов, которые включают разработку концепции, долгое проектирование и фазу подготовки документов (табл. 1).

Таблица 1

6 этапов жизненного цикла изделия

№	Фаза (по NASA)	Содержание работ (включая ручной труд)	Срок выполнения	Результат
1	Концепция (Phase A)	Определение целей миссии, расчет бюджета и технико-экономическое обоснование проекта.	1–12 месяцев	Утвержденный паспорт миссии
2	Проектирование (Phase B)	Разработка архитектуры, выбор комплектующих и подача заявок на запуск.	1–9 месяцев	Технический проект
3	Лицензирование (Phase C)	Оформление разрешений на радиочастоты (ГКРЧ/FCC) и регистрация космического объекта.	4–12 месяцев	Пакет разрешительных документов
4	Сборка и тесты (Phase D)	Ручной монтаж компонентов, пайка плат, сборка наземного сегмента и термовакуумные испытания.	2–12 месяцев	Готовый летный образец
5	Интеграция и запуск (Phase D)	Установка в транспортно-пусковой контейнер и стыковка с ракетой-носителем.	1–3 месяца	Вывод на целевую орбиту
6	Эксплуатация (Phase E/F)	Управление аппаратом, ручной анализ телеметрии и завершение работы.	от 1 года	Научные и прикладные данные

В мире прогресс не стоит на месте и некоторые компании уже оптимизируют производство, внедряя средства автоматизации и роботизации. Один из примеров в России является акционерное общество «Решетнёв», на мощностях которого осуществляется переход к серийному изготовлению космических аппаратов на базе модульной платформы М (рис. 1). Эта технологическая база легла в основу проекта Марафон-IoT, предполагающего развертывание масштабной орбитальной группировки для обеспечения интернета вещей. Производственный план предусматривает выход на темпы сборки одного аппарата каждые два дня к 2026 году. Основным изменением стал отказ от индивидуальной подгонки деталей в пользу использования унифицированного шасси. Роботизированные манипуляторы устанавливают готовые функциональные блоки в посадочные места, что минимизирует вероятность ошибок и исключает человеческий фактор при монтаже систем. При таком подходе радикально меняется роль персонала в цехе. Высококвалифицированные инженеры перестают быть монтажниками, выполняющими ручные операции, и становятся операторами автоматизированной линии, которые контролируют работу программных комплексов и исправность оборудования



Рис. 1. Модульная платформа М

ОАО «РКК «Энергия» имени С. П. Королёва, головная организация России по пилотируемым космическим системам, базирующаяся в Королёве, осуществляет переход к поточному производству в рамках амбициозных автоматических программ, таких как проект «Сфера». Используя опыт создания унифицированных космических платформ, корпорация внедряет современные методы цифрового инжиниринга и управления жизненным циклом изделия. Технологическая логика производства смещается от индивидуальной сборки уникальных аппаратов к конвейерным методам интеграции, где прецизионное позиционирование узлов и автоматизированный контроль качества позволяют увеличить темпы выпуска продукции. Подобный переход критически важен для обеспечения восполнения многоспутниковых группировок связи и дистанционного зондирования Земли, обеспечивая стабильную повторяемость характеристик и снижение зависимости от человеческого фактора на этапах финальной сборки и наземной отработки. Это позволяет корпорации трансформировать традиционные методы создания техники в современную индустриальную модель, способную удовлетворять потребности в сотнях серийных аппаратов

Китайский завод корпорации CASIC в городе Ухань функционирует как первый в мире интеллектуальный промышленный объект для производства малых космических аппаратов (рис. 2). Проектная мощность этого комплекса позволяет выпускать 240 спутников в год, что сокращает время создания одного изделия до полутора суток. Ключевой особенностью площадки является полное исключение ручных логистических операций внутри сборочного цеха. Перемещение компонентов и готовых узлов между рабочими зонами осуществляют беспилотные тележки AGV, ориентирующиеся в пространстве по лазерным датчикам. Сборку узлов и последующее функциональное тестирование проводят роботизированные манипуляторы, полностью исключающие участие людей в процессах интеграции. Внедрение таких технологий обеспечило рост эффективности труда на 40 процентов по сравнению с традиционными методами ручной сборки. Завод представляет собой единую цифровую экосистему, где каждый этап производства фиксируется автоматикой в режиме реального времени



Рис. 2. Китайский завод корпорации CASIC

Компания SpaceX внедрила в космическую индустрию принципы поточного производства, заимствованные из автомобильной промышленности. (рис. 3) На специализированных заводах в Бастропе и Хоторне достигнут рекордный темп выпуска, составляющий от 6 до 10 спутников Starlink в сутки. Столь высокая производительность стала возможной благодаря переходу на плоский дизайн корпуса, известный как Flat-pack. Такая форма специально разработана для обеспечения надежного захвата и перемещения роботами на конвейерной линии. Производственный цикл включает полностью автоматическую пайку печатных плат и установку антенн с фазированной решеткой при помощи высокоточных манипуляторов. Использование роботизированных систем на всех этапах сборки позволило снизить стоимость одного аппарата в 10–20 раз по сравнению с методами ручной подгонки узлов. Автоматизация становится базовым условием для оперативного пополнения орбитальных сегментов и обеспечения глобальной связности, где скорость выпуска техники является определяющим фактором лидерства



Рис. 3. Роботизированные системы компании SpaceX

Предприятие OneWeb Satellites, расположенное в Эксплорейшн-Парк на острове Мерритт, штат Флорида, является первым в США заводом, спроектированным для массового серийного выпуска космических аппаратов (рис. 4). Производственные мощности предприятия позволяют выпускать до двух, а в перспективе и до трех спутников в день, что необходимо для формирования и поддержания группировки из более чем 600 аппаратов. Технологическая база завода опирается на «умные» методы производства, интеллектуальные системы сбора данных и использование модульных конфигураций шасси весом около 150 кг. Высокая эффективность достигается за счет автоматизации циклов сборки, что позволило OneWeb производить аппараты в больших объемах и с меньшими затратами, чем любой спутник, ранее построенный партнером проекта – компанией Airbus. Географическая близость к космодрому имени Кеннеди обеспечивает уникальную логистическую эффективность: запуск готового изделия на орбиту может быть осуществлен спустя считанные часы после выхода с конвейера.



Рис. 4. Предприятие OneWeb Satellites

Компания Millennium Space Systems, штаб-квартира которой находится в Манхэттен-Бич, Калифорния, специализируется на скоростном создании прототипов и серийных решений для задач национальной безопасности и науки (рис. 5). Являясь дочерней структурой Boeing, предприятие внедрило методы гибкой («agile») разработки, производя более 20 ключевых компонентов спутника собственными силами. Производственные линии компании ориентированы на архитектуру «Plug-n-Play», основанную на стандартах SpaceWire, что позволяет быстро интегрировать различные полезные нагрузки в унифицированные платформы массой от 10 до 3000 кг для работы на любых орбитах. Эффективность Millennium Space Systems подтверждается 100% успехом миссий и способностью на порядок превосходить традиционные системы по мощности бортовой обработки данных. Автоматизированный подход к проектированию и испытаниям позволяет компании трансформировать единичные научные задачи в масштабируемые проекты крупных орбитальных созвездий в кратчайшие сроки.



Рис. 5. Компания Millennium Space Systems

Таблица 2

Сравнительная характеристика роботизированного производства МКА (на 2026 г.)

Компания / Проект	Цикл производства	Мощность (шт./год)	Уровень автоматизации	Капитализация / Стоимость	Себестоимость (примерно)
SpaceX (Starlink)	1 аппарат за 4–6 часов	~2000–3000	Максимальный (дизайн под робозахват)	~$1.75 – 2.0 трлн (оценка IPO)	в 10–20 раз ниже рынка
OneWeb Satellites	1 аппарат за 12–18 ч	~440–500	Высокий (конвейер Airbus)	~$3.5 – 5.0 млрд (оценка активов)	$1–2 млн за ед.
Millennium Space	~14 дней на аппарат	26 (план)	Средний (стандартизация)	~$170 млрд (Boeing)	средняя по рынку
АО «Решетнёв»	1 аппарат за 2 дня	~150–200	Высокий (Платформа М)	~30.2 млрд руб. (уст. капитал)	оптимизирована под госзаказ
РКК «Энергия»	в разработке	до 100+ (цель)	Высокий (линии для «Сферы»)	~50–60 млрд руб. (рыночная)	снижение костов на 40%
Blue Canyon	серийно (узлы)	2400 (узлов)	Высокий (автобалансировка)	~$273 млрд (RTX)	лидер по цене за узел

Подводя итог исследованию, необходимо признать, что глобальный переход от ручного труда к интеллектуальным роботизированным линиям является единственно возможным путем развития современной космонавтики. Эпоха штучного изготовления уникальных аппаратов, когда создание одного кубсата занимало от 18 до 24 месяцев ручного труда квалифицированных инженеров, безвозвратно уходит в прошлое. Современные вызовы по развертыванию многоспутниковых группировок, насчитывающих сотни и тысячи единиц, диктуют требования к серийности, которые физически невозможно реализовать методами лабораторной сборки, характерными для ранних этапов развития отрасли.

Внедрение роботизированных комплексов радикально трансформирует экономическую модель отрасли, превращая космический аппарат в стандартный индустриальный продукт массового производства. Когда роботы заменяют человека на самых ответственных этапах сборки, количество ошибок и случайных поломок при старте резко снижается. При этом общая

производительность завода выходит на совершенно другой уровень. Автоматизация позволяет повысить общую производительность более чем на 40%, обеспечивая темпы выпуска до 240 малых спутников в год на одну линию или даже достигая показателей в 6–10 единиц в сутки в наиболее передовых сегментах. Такая **масштабируемость** процессов становится базовым условием для обеспечения глобальной связности и оперативного восполнения орбитальных сегментов.

Чтобы отечественные разработки оставались востребованными и независимыми, важно не только копировать готовые технологии, но и создавать свои методы производства на опережение. Это подразумевает создание собственных унифицированных модульных платформ, таких как отечественная «М-платформа», адаптированная под поточное изготовление. Мы должны стремиться к поиску и созданию лучших мировых практик, совершенствуя алгоритмы автоматизации и цифровые двойники производственных процессов, чтобы превзойти глобальные тренды серийного спутникостроения.

Развитие автоматизированных цехов уже сейчас позволит обеспечить лидерство в космосе в ближайшем будущем. Переход к конвейерной сборке и высокотехнологичным методам контроля является фундаментом, на котором будет строиться превосходство в новой эре индустриального космоса. Мы стоим на пороге великих свершений, где автоматизация становится главным инструментом утверждения национальных интересов на орбите.

Список литературы

1. Ткаченко И.С. Концептуальная модель цифрового завода серийного производства малых космических аппаратов / И.С. Ткаченко, Д.В. Антипов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 331–337
2. Ткаченко И.С. Методические подходы к созданию и функционированию серийного роботизированного производства малых космических аппаратов / И.С. Ткаченко // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 3. С. 178–194
3. Прокофьев А.Б. Подходы к созданию серийного роботизированного производства малых космических аппаратов / А.Б. Прокофьев, И.С. Ткаченко, Д.В. Антипов // Созвездие Роскосмоса: траектория науки : материалы II Отраслевой научно-практической конференции (Красноярск, 04–06 октября 2023 года). Красноярск: СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2023. С. 96–98
4. Ковкин И.В. Автоматизация испытаний систем электропитания малых космических аппаратов: проблемы серийного производства / И.В. Ковкин, Э.П. Кениг, Н.В. Москаленко // Решетневские чтения : материалы XXIX Международной научно-практической конференции (Красноярск, 10–14 ноября 2025 года). Красноярск: СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2025. С. 655–657
5. Зимин И.И. Особенности разработки малого космического аппарата для обеспечения серийного производства / И.И. Зимин, С.И. Меркулов, М.А. Смирнов // Решетневские чтения : материалы XXVII Международной научно-практической конференции (Красноярск, 08–10 ноября 2023 года). Красноярск: СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева, 2023. С. 78–80
6. Аспекты серийного производства малых космических аппаратов, планируемых к созданию на базе перспективной масштабируемой унифицированной космической платформы / В.В. Хартов, А.А. Ризванов, Е.В. Пустовалов [и др.]. Москва: Буки Веди, 2023. 28 с

7. Михеев М.А. Разработка инструментария проектирования конструкций малых космических аппаратов нанокласса типа Cubesat под возможности серийной роботизированной сборки / М.А. Михеев // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6(87). С. 558–566

8. Баринова Е.В. Проектирование и стабилизация наноспутников стандарта CubeSat: монография / Е.В. Баринова. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2023. 184 с

9. Белов М.П. Проектирование конструкций космических аппаратов / М.П. Белов, Г.И. Бутаков. Москва: Машиностроение, 2021. 416 с

10. Петров А.П. Автоматизация проектирования космических аппаратов / А.П. Петров, В.В. Сидоров // Космическая техника и технологии. 2020. № 1(22). С. 45–56

Чиков А.Д.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
4466113@gmail.com
Шагиев Р.Р.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
continenttt@mail.ru
Архипов Ю.Г.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
yura.arkhipov.2004@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПАМЯТИ В СИМУЛЯТОРЕ РОЯ БПЛА С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ КВАДРОДЕРЕВА

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема оптимизации потребления памяти в программном симуляторе роя беспилотных летательных аппаратов, предназначенном для исследования алгоритмов обследования территории. Ключевой задачей симулятора является отслеживание состояния исследованных и неисследованных областей карты, представленной в виде двумерной сетки с разрешением 25 см на ячейку. При моделировании крупных территорий (до 24 км²) наивные подходы к хранению состояния карты требуют десятков мегабайт памяти, что ограничивает масштабируемость экспериментов. Предложена гибридная структура данных на основе квадродерева, в которой рекурсивное деление пространства прекращается при достижении размера области 32×32 ячейки, после чего данные хранятся в виде компактного битового массива. Такой подход сочетает преимущества иерархического представления для разреженных данных и эффективность плотных массивов для локально однородных участков. Проведено сравнительное тестирование трёх моделей: наивного битового массива, классического квадродерева и предложенной гибридной структуры. Эксперименты на картах площадью 1,5, 6

и 24 км² продемонстрировали, что гибридная структура обеспечивает снижение потребления памяти более чем в 10 раз по сравнению с альтернативами, особенно на крупных картах со сложным паттерном обследования. Результаты исследования подтверждают практическую значимость предложенного подхода для создания масштабируемых симуляторов роевых систем, позволяя моделировать более крупные рои и проводить длительные эксперименты в условиях ограниченных ресурсов памяти.

Ключевые слова: рой БПЛА, обследование территории, квадродерево, гибридная структура данных, оптимизация памяти, битовый массив, пространственные данные.

Chikov A.D.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
4466113@gmail.com
Shagiev R.R.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
continenttt@mail.ru
Arkhipov Yu.G.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
yura.arkhipov.2004@mail.ru

OPTIMIZING MEMORY CONSUMPTION IN A UAV SWARM SIMULATOR USING A HYBRID QUADTREE-BASED DATA STRUCTURE

Abstract. This paper addresses the problem of optimizing memory consumption in a software simulator for unmanned aerial vehicle (UAV) swarms, designed for researching area coverage algorithms. A key function of the simulator is tracking the status of explored and unexplored regions within a map, which is represented as a 2D grid with a resolution of 25 cm per cell. When simulating large territories (up to 24 km²), naive approaches to storing map state require tens of megabytes of memory, thereby limiting the scalability of experiments. A hybrid data structure based on a quadtree is proposed, in which recursive spatial subdivision ceases once a region size of 32×32 cells is reached, after which the data is stored as a compact bit array. This approach combines the advantages of a hierarchical representation for sparse data with the efficiency of dense arrays for locally homogeneous regions. Comparative testing was conducted on three models: a naive bit array, a classic quadtree, and the proposed hybrid structure. Experiments conducted on maps covering areas of 1.5, 6, and 24 km² demonstrated that the hybrid structure reduces memory consumption by more than a factor of 10 compared to the alternatives–particularly on large maps featuring complex coverage patterns. The results of this study confirm the practical significance of the proposed approach for developing scalable swarm system simulators, enabling the modeling of larger swarms and the execution of long-duration experiments under conditions of limited memory resources.

Keywords: UAV swarm, area coverage, quadtree, hybrid data structure, memory optimization, bit array, spatial data structures.

Современные исследования в области роевых систем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) требуют эффективных инструментов для моделирования и тестирования алгоритмов коллективного поведения. Одной из ключевых задач является обследование территории, где множество дронов координированно исследуют заданную область. Для разработки и отладки таких алгоритмов необходимы программные симуляторы, способные обрабатывать пространственные данные в реальном времени.

Однако масштабируемость симуляторов часто ограничивается объемом памяти, требуемым для хранения состояния обследованной территории. В рассматриваемом симуляторе территория представляется в виде двумерного изображения с заданным физическим размером и разрешением 25 см на ячейку. Изначально вся территория находится в состоянии «неисследована». По мере пролета дронов в их окрестности (в заданном радиусе) ячейки помечаются как «исследованные». Пользователь может загружать собственные карты, задавать начальные позиции дронов и реализовывать произвольные алгоритмы управления.

При размере территории 24 км² и разрешении 25 см общее количество ячеек достигает 384 миллионов. Хранение состояния каждой ячейки в виде одного бита требует ~46 МБ памяти. Хотя современные системы обладают достаточным объемом ОЗУ, чрезмерное потребление памяти симулятором ограничивает возможность моделирования крупных роев, проведения длительных экспериментов и параллельного запуска нескольких сценариев.

В первой версии симулятора для отслеживания исследованных областей использовалось классическое квадродерево (qtree), рекурсивно разделяющее пространство на четыре квадранта до уровня отдельных ячеек. Однако эмпирическое тестирование показало, что такая реализация потребляет даже больше памяти, чем простой битовый массив, из-за высоких накладных расходов на хранение указателей и метаданных узлов.

В данной работе представлена оптимизированная гибридная структура данных, сочетающая преимущества квадродерева для представления разреженных данных и компактность битовых массивов для локально плотных областей. Ключевая инновация заключается в установлении порога рекурсии: области размером 32×32 ячейки и менее хранятся не как поддеревья, а как битовые массивы. Экспериментальные результаты демонстрируют снижение потребления памяти более чем в 10 раз по сравнению с альтернативными подходами.

Цель исследования – количественная оценка эффективности предложенной структуры данных и демонстрация её применимости для создания масштабируемых симуляторов роевых систем. Фокус работы сделан именно на аспекте оптимизации памяти; алгоритмы обследования территории рассматриваются как контекст применения структуры, а не как объект исследования.

Для оценки эффективности были реализованы и протестированы три подхода к хранению состояния карты:

1. Наивный битовый массив (Naïve Array). Простейшая реализация: состояние каждой ячейки хранится в виде одного бита в линейном массиве. Для карты размером W x H ячеек требуется [W x H/8] байт памяти. Преимущество – постоянное время доступа O(1) к любой ячейке. Недостаток – потребление памяти линейно растёт с площадью карты независимо от процента исследованной территории.

2. Исходное квадродерево (Original QTree). Классическая рекурсивная структура, где каждый узел может находиться в одном из состояний: FullOff (вся область неисследована), FullOn (вся область исследована) или Mixed (область содержит смесь состояний и делится на четыре дочерних узла). Рекурсия продолжается до уровня отдельных ячеек. Теоретически эффективна для разреженных данных, но на практике страдает от накладных расходов: каждый узел Mixed содержит четыре указателя Arc<Node>, а каждый отдельно выделенный узел создаёт фрагментацию памяти.

3. Гибридное квадродерево с битовыми листьями (Optimized Hybrid QTree). Предлагаемая структура расширяет исходное квадродерево специализированным типом узла Bitmap { size: u32, data: Box<[u8]> }. При достижении размера области порога BITMAP_LEAF_SIZE = 32 рекурсия прекращается, и область представляется компактным битовым массивом размером $\lceil (32 \cdot 32)/8 \rceil = 128$ байт . Это позволяет радикально сократить число узлов для локально плотных участков, сохраняя преимущества иерархического представления для больших однородных областей.

Ключевые алгоритмы гибридной структуры

Центральным методом обновления состояния является set_circle_on, моделирующий обследование территории в окрестности дрона. Его логика включает три этапа:

```
fn set_circle_on(&mut self, this_rect: IntRect, circle: &Circle) {
    // 1. Полное попадание: вся область становится исследованной
    if this_rect.fully_inside_circle(circle) {
    *self = Node::FullOn;
    return;
    }
    // 2. Полное отсутствие пересечения: ничего не меняем
    if this_rect.fully_outside_circle(circle) {
    return;
    }
    // 3. Порог рекурсии: переход к битовому представлению
    let side_len = this_rect.side_len();
    if side_len <= BITMAP_LEAF_SIZE {
    // Преобразование текущего узла в Bitmap и установка битов
    // ... (детали опущены для краткости)
    return;
    }
    // 4. Рекурсивное деление для крупных областей
    // ... (обработка детей узла Mixed)
}
```

При переходе к битовому представлению (Bitmap) содержимое предыдущего узла (если он был Mixed) сначала копируется в новый массив, после чего применяются изменения от текущего круга. Это гарантирует сохранение ранее накопленной информации об исследованных ячейках.

Методы запросов (iter_on, count_cells_on, percentage_on) также адаптированы под гибридную структуру: для узлов Bitmap итерация происходит по установленным битам, для Mixed – рекурсивно по детям, для FullOn/FullOff – возвращаются площадь области или ноль соответственно.

План эксперимента

Тестирование проводилось на трёх сценариях, различающихся размером карты при фиксированном разрешении 25 см/ячейка (табл.).

Таблица

Результаты тестирования

Сценарий	Площадь	Размер в ячейках	Теоретических минимум памяти (битовый массив)
Малая карта	1.5 км²	~24 млн	~3 МБ
Средняя карта	6 км²	~96 млн	~12 МБ
Большая карта	24 км²	~384 млн	~46 МБ

Для каждого сценария запускался симуляционный прогон, в котором дроны выполняли стандартный алгоритм обследования (зигзагообразное покрытие). После завершения измерялись:

- Общее потребление памяти структурой через метод estimated_bytes(), рекурсивно суммирующий размер каждого узла с учётом накладных расходов Arc ;
- Количество узлов через node_count() для оценки степени сжатия данных.

Потребление памяти на картах различного масштаба

Малая карта (1.5 км²). Кривая «наивный массив» представляет собой горизонтальную линию на уровне ~3 МБ, что соответствует теоретическому минимуму. Кривая «исходное квадродерево» начинается со значения 1 МБ и быстро увеличивается: высокие накладные расходы на узлы для мелких разрозненных областей делают эту структуру менее эффективной, чем простой массив. Кривая «гибридное квадродерево» демонстрирует рост после первых итераций и стабилизируется на уровне ~0.3 МБ – выигрыш ~10× относительно наивного подхода (рисунок 1).

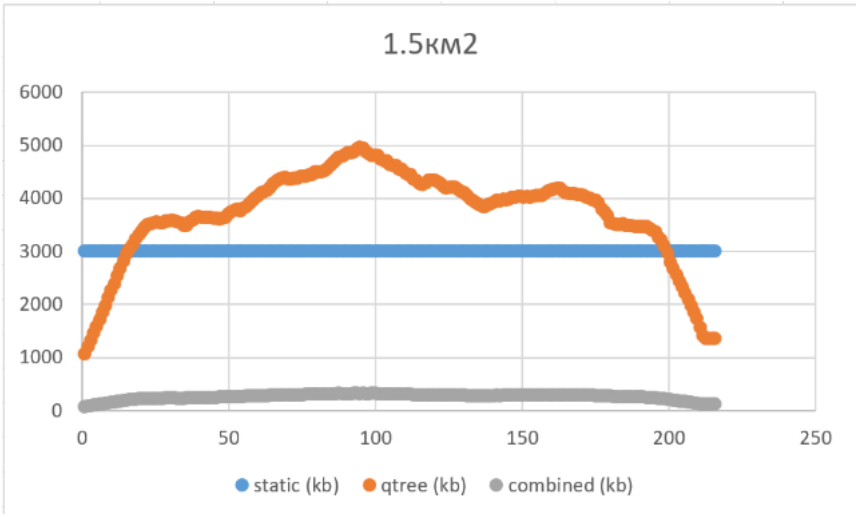


Рис. 1. График результата эксперимента на малой карте

Средняя карта (6 км²). Наивный массив требует ~12 МБ. Исходное квадродерево потребляет 1 МБ, впоследствии потребление увеличивается до 10 МБ, что все еще эффективнее, чем наивный подход. Гибридная структура удерживает потребление на уровне 0.7 МБ, обеспечивая выигрыш 14× (рисунок 2.).

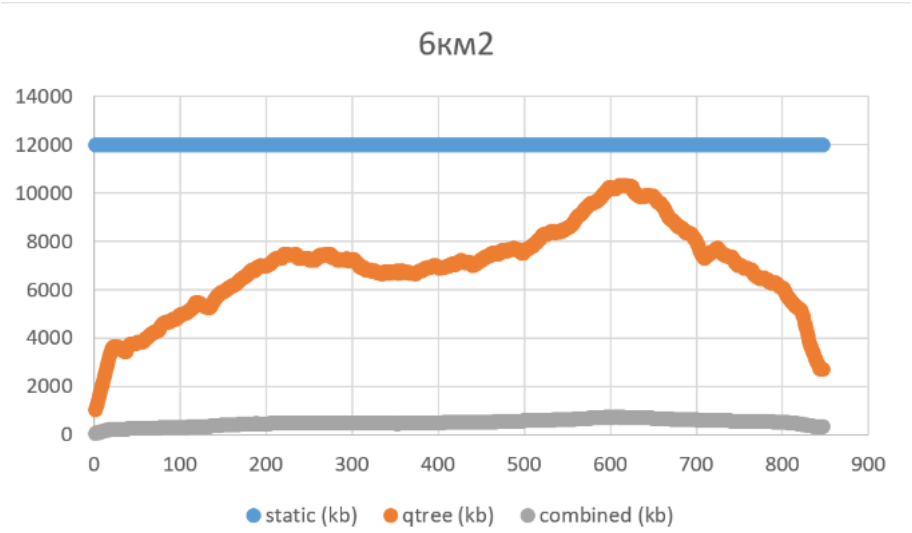


Рис. 2. График результата эксперимента на средней карте

Большая карта (24 км²). Здесь преимущества гибридного подхода проявляются наиболее ярко. Наивный массив требует ~46 МБ. Пиковое потребление квадродерева достигает 20 МБ. Гибридная структура потребляет всего 1.6 МБ в пике, что соответствует снижению более чем в 12 раз. При обследовании крупных сплошных областей потребление может опускаться ниже 1.3 МБ благодаря представлению таких участков узлами FullOn (рисунок 3).

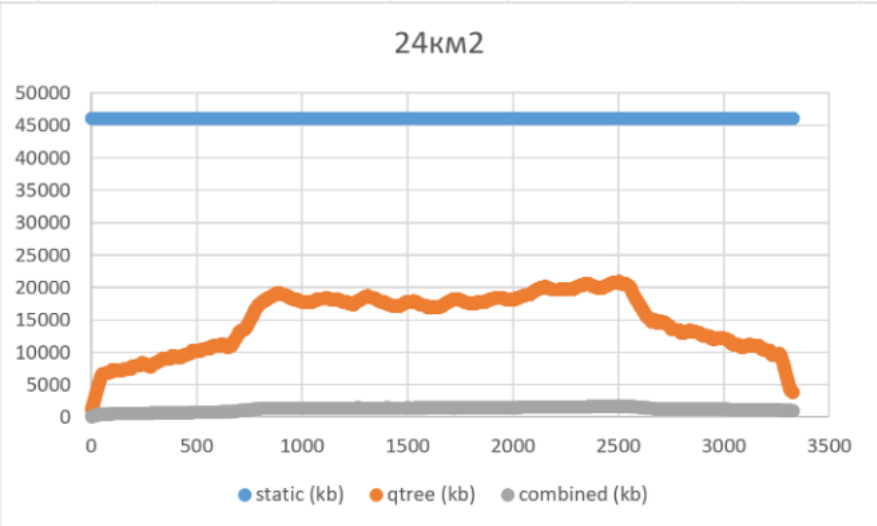


Рис. 3. График результата эксперимента на большой карте

Список литературы

1. Finkel, R. A., Bentley, J. L. (1974). Quad trees: A data structure for retrieval on composite keys // Acta Informatica, 4(1), 1–9.

2. Samet, H. (2006). Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures // Morgan Kaufmann.

3. Samet, H. (1984). The quadtree and related hierarchical data structures // ACM Computing Surveys, 16(2), 187–260.

4. Gaede, V., Günther, O. (1998). Multidimensional access methods // ACM Computing Surveys, 30(2), 170–231.

5. Losa, D., Kozhaya, D. (2020). Memory-efficient spatial indexing for large-scale simulations // Journal of Parallel and Distributed Computing, 145, 78–91.

6. Toss, J., Pahins, C. A. (2018). Packed-Memory Quadtree: A cache-oblivious data structure for visual exploration of streaming spatiotemporal big data // Proceedings of the 26th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, 425–428.

7. Kumar, K., Kumar, N. (2023). Region coverage-aware path planning for unmanned aerial vehicles: A systematic review // Physical Communication, 58, 102073.

8. Cabreira, T. M., Brisolara, L. B., & Ferreira, P. R. (2019). Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles // Drones, 3(1), 4.

9. Cybulski, P. (2019). A framework for autonomous UAV swarm behavior simulation // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2341–2348.

Сабитов Р.А.
к.т.н., доцент кафедры «Динамика процессов и управления»
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
Мадаминов Х.О.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
madaminovkho@stud.kai.ru

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Аннотация. В работе представлена система управления автономным колёсным роботом с элементами искусственного интеллекта. Главный вычислительный модуль системы – микроконтроллер Arduino Uno. Робот использует ультразвуковой дальномер HC-SR04, который установлен на сервоприводе SG90. Для управления скоростью применяется алгоритм нечёткой логики. Этот алгоритм меняет скорость робота в зависимости от расстояния до препятствия. В статье описаны постановка задачи, обзор существующих решений, аппаратная часть, алгоритм управления и программная реализация. Также представлены результаты испытаний прототипа. Проведено сравнение классического порогового алгоритма и нового алгоритма на нечёткой логике. Результаты испытаний показывают, что нечёткая логика повышает долю успешных манёвров обхода препятствий с 85–90% до 90–95%. Время реакции системы составляет 150–200 мс. Сделан вывод, что нечёткая логика повышает надёжность движения робота. При этом стоимость деталей остаётся низкой, а сама система простая в сборке. Такой подход хорошо подходит для учебных и сервисных задач.

Ключевые слова: автономный робот, Arduino Uno, HC-SR04, нечёткая логика, искусственный интеллект, ультразвуковой датчик, обход препятствий.

Sabitov R.A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
of Process Dynamics and Control
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
Madaminov H.O.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
madaminovkho@stud.kai.ru

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN THE CONTROL SYSTEM OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROBOT

Abstract. This paper presents a control system for an autonomous wheeled robot with elements of artificial intelligence. The main computing module of the system is an Arduino Uno microcontroller. The robot uses an HC-SR04 ultrasonic rangefinder mounted on an SG90 servo. A fuzzy logic algorithm is used for speed control. This algorithm changes the speed of the robot

depending on the distance to the obstacle. The paper describes the problem statement, a review of existing solutions, the hardware, the control algorithm, and the software implementation. The test results of the prototype are also presented. A comparison was made between the classical threshold algorithm and the new fuzzy logic algorithm. The test results show that fuzzy logic increases the share of successful obstacle avoidance maneuvers from 85–90% to 90–95%. The system reaction time is 150–200 ms. It is concluded that fuzzy logic improves the reliability of robot motion. At the same time, the cost of components remains low, and the system itself is simple to assemble. This approach is well suited for educational and service tasks.

Keywords: autonomous robot, Arduino Uno, HC-SR04, fuzzy logic, artificial intelligence, ultrasonic sensor, obstacle avoidance.

Создание автономных роботов – одно из самых популярных направлений в современной технике. Такие роботы могут двигаться в реальной среде без помощи человека. В последние годы особое внимание уделяется простым и недорогим роботам. Их можно использовать не только в учебных целях, но и в научных и сервисных задачах. Подобные системы часто становятся первым шагом к созданию более сложных решений. К ним относятся, например, промышленные роботы, беспилотные автомобили и роботы-помощники [3, 10].

Одна из главных задач при разработке мобильного робота – обнаружение препятствий и быстрый выбор пути обхода. Многие готовые решения используют дорогие датчики, такие как лидары или стереокамеры. Часто такие системы хорошо работают только в заранее подготовленной среде. Для учебных и исследовательских проектов лучше подходят ультразвуковые датчики. Они стоят недорого, но при этом дают приемлемую точность измерения расстояния в диапазоне до нескольких метров [1, 2, 6, 7].

Однако простой ультразвуковой датчик с пороговым алгоритмом не даёт плавного и предсказуемого поведения. Робот резко переключается между режимами «ехать» и «остановка». Это приводит к рывкам, ускоренному износу механики и повышает риск столкновения на высокой скорости. Чтобы решить эту проблему, часто применяют методы искусственного интеллекта. Один из таких методов – нечёткая логика. Её основы заложил Л. Заде в 1965 году [8]. Позже её активно использовали в инженерных задачах [9]. Нечёткая логика может работать с неточными данными и формирует плавные управляющие сигналы. Это особенно полезно для задач навигации в режиме реального времени [5].

В данной работе предлагается подход, при котором робот использует доступные детали и при этом действует «умно». Цель работы – разработать систему управления автономным мобильным роботом. Робот построен на базе Arduino Uno, использует датчик HC-SR04 и алгоритм нечёткой логики. Алгоритм должен обеспечивать гибкое управление скоростью и выбор направления движения. Для достижения цели в работе решены следующие задачи: выбор и обоснование набора деталей, разработка электрической схемы, построение алгоритма на основе нечёткой логики, программная реализация и проверка работы прототипа на практике.

Аппаратная часть системы состоит из следующих основных элементов: микроконтроллер Arduino Uno (на базе ATmega328P, тактовая частота 16 МГц), ультразвуковой датчик HC-SR04, сервопривод SG90, мобильная платформа с двумя двигателями постоянного тока и драйвером H-мост, источник питания 9 В и беспаечная макетная плата. Arduino Uno выбран по нескольким причинам. У него достаточно портов ввода-вывода, есть ШИМ-каналы и большое количество готовых библиотек [1, 4].

Ультразвуковой датчик HC-SR04 измеряет расстояние от 2 до 400 см. Его погрешность – около ±3 мм. Принцип работы простой: датчик посылает ультразвуковой сигнал и измеряет время его возврата от препятствия. Расстояние рассчитывается по формуле:

$$D = t / 58{,}2, \quad (1)$$

где D – расстояние до объекта (см), t – длительность сигнала Echo (мкс). Коэффициент 58,2 получен следующим образом: единица длины делится на скорость звука в воздухе и умножается на два: $2 / 0{,}034 \approx 58{,}2$ [4, 7].

Чтобы расширить область обзора, датчик установлен на сервоприводе SG90. Это позволяет измерять расстояние в нескольких направлениях – вперёд, влево и вправо – без добавления новых датчиков. Все детали соединены на макетной плате без пайки. Питание системы разделено на две части: двигатели получают энергию от отдельного источника, а управляющая часть – от контроллера. Такое разделение снижает влияние пусковых токов двигателей. Это делает работу микроконтроллера и измерительной системы более стабильной.

Алгоритм управления работает по реактивному принципу. Это значит, что система выполняет цикл: измерение, анализ и принятие решения. В отличие от простых пороговых методов, в данной системе используется нечёткая логика. Она позволяет учитывать неточность входных данных и более гибко управлять скоростью робота [8]. Использование нечётких контроллеров для подобных задач уже доказало свою эффективность во многих инженерных проектах [9].

Нечёткая логика работает с лингвистическими переменными вместо жёстких числовых порогов. Входная переменная – расстояние до препятствия D. Оно делится на три нечётких множества: «близко» ($D < 20$ см), «умеренно» (20–50 см) и «далеко» ($D > 50$ см). Выходная переменная – скорость двигателей V. Она тоже разбита на три уровня: «стоп», «медленно» и «быстро». Правила вывода выглядят так:

• ЕСЛИ расстояние «близко» – ТО скорость «стоп», выполнить манёвр обхода;

• ЕСЛИ расстояние «умеренно» – ТО скорость «медленно», продолжать движение вперёд;

• ЕСЛИ расстояние «далеко» – ТО скорость «быстро», продолжать движение вперёд.

Такой подход обеспечивает плавное изменение скорости при приближении к препятствию. Это устраняет главный недостаток порогового алгоритма – резкую остановку на пороге 20 см. В новой системе манёвр начинается заранее, а риск столкновения снижается.

Если робот видит препятствие в зоне «близко», сервомотор по очереди поворачивается на 0° и 180°. Он измеряет расстояния D_right и D_left. Робот выбирает направление, где значение больше, и поворачивает в эту сторону на 500 мс. После этого сервомотор возвращается в положение 90°, и цикл повторяется. Программная часть написана на языке C/C++ в среде Arduino IDE. Управление сервоприводом выполняется через библиотеку Servo.h. Нечёткие правила записаны в виде функций принадлежности и таблицы логического вывода. Команды для скорости и направления передаются на двигатели через ШИМ-выходы контроллера.

Прототип был собран и испытан в закрытом помещении. В качестве препятствий использовались разные объекты: предметы с плоскими гранями (книги, картонные коробки) и с криволинейными поверхностями (пластиковые бутылки). Сравнивались два режима работы: классический пороговый алгоритм и новый алгоритм на нечёткой логике.

При работе с нечёткой логикой робот начинал снижать скорость на расстоянии 50 см от препятствия. Полная остановка происходила на 20 см. Благодаря этому доля успешных манёвров обхода увеличилась с 85–90% до 90–95%. Время реакции системы составило 150–200 мс. Эта задержка складывается из времени измерительного цикла, программных пауз и инерции механики [1, 4].

В ходе испытаний выяснилось, что нечёткая логика частично решает проблему высокой скорости. При пороговом алгоритме на высокой скорости успешными были только 25–30% манёвров. С нечёткой логикой этот показатель вырос до 55–60% [4]. Причина в том, что робот начинает тормозить заранее. Дальномер HC-SR04 стабильно работал в диапазоне от 5 до 200 см. Отклонение его показаний не превышало 1,5% [2, 3].

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей. В работах [1, 7, 10] также отмечается, что ультразвуковой датчик на сервоприводе хорошо обнаруживает препятствия в разных условиях. Применение нечёткой логики делает управление более плавным по сравнению с пороговыми методами [5, 9]. Однако в большинстве известных решений робот двигается с фиксированной скоростью. В предложенной системе скорость меняется в реальном времени, и это повышает безопасность движения.

При этом нужно отметить и слабые стороны системы. Во-первых, датчик HC-SR04 имеет ограниченное угловое разрешение. Он плохо работает с поверхностями, которые поглощают звук (например, мягкие ткани). Также возникают проблемы, когда поверхность стоит под острым углом к лучу. Во-вторых, реактивный алгоритм не строит карту среды. Поэтому робот не может решать задачи планирования маршрута в сложных лабиринтах. В-

третьих, питание двигателей идёт от отдельного источника. Это требует постоянного контроля напряжения, особенно при разряде батареи.

Таким образом, использование нечёткой логики как элемента искусственного интеллекта повышает надёжность движения робота. При этом стоимость деталей остаётся низкой, а сама система простая в сборке. У системы есть и перспективы для развития. Среди них – применение алгоритмов машинного обучения для распознавания типов препятствий. Также можно добавить модуль компьютерного зрения на базе ESP32-CAM. Ещё одно направление – интеграция беспроводного интерфейса для дистанционного мониторинга [4, 5]. Полученные результаты показывают, что сочетание простой сенсорной базы с интеллектуальными алгоритмами – эффективный подход для создания недорогих автономных роботов.

Список литературы

1. Baballe M.A., Bello M.I. Obstacle Avoidance Robot using an Ultrasonic Sensor with Arduino Uno // East African Scholars Journal of Engineering and Computer Sciences. – 2023. – Vol. 6, No. 6. – P. 78–86. – DOI: 10.36349/easjecs.2023.v06i06.001.

2. Gabriel M.M., Kuria K.P. Arduino Uno, Ultrasonic Sensor HC-SR04 Motion Detector with Display of Distance in the LCD // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2020. – Vol. 9, No. 5. – P. 936–942.

3. Ahmmed F. et al. Arduino-Controlled Multi-Function Robot with Bluetooth and nRF24L01+ Communication // International Journal of Robotics and Control Systems. – 2024. – Vol. 4, No. 3. – P. 1353–1381. – DOI: 10.31763/ijrcs.v4i3.1517.

4. Hidayati Q. Obstacle Avoidance Mobile Robot With Ultrasonic Sensors // Jurnal Teknologi Terpadu. – 2017. – Vol. 5, No. 1. – P. 77–81.

5. Khaleel H.Z., Oleiwi B.K. Ultrasonic sensor decision-making algorithm for mobile robot motion in maze environment // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13, No. 1. – P. 109–116. – DOI: 10.11591/eei.v13i1.6560.

6. Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, No. 3. – DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189.

7. Azeta J. et al. Obstacle detection using ultrasonic sensor for a mobile robot // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 707. – Art. 012012.

8. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, No. 3. – P. 338–353. – DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

9. Mendel J.M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial // Proceedings of the IEEE. – 1995. – Vol. 83, No. 3. – P. 345–377. – DOI: 10.1109/5.364485.

10. Suryanarayana S., Akhila V. Autonomous Maze Solving Robot Using Arduino // International Journal Advanced Research Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 12, No. 3. – P. 595–603.

Борисова О.В.
инженер международной лаборатории биомехатроники
и энергоэффективной робототехники
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
ovborisova@itmo.ru
Борисов И.И.
к.т.н., профессор факультета систем управления и робототехники
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
borisovii@itmo.ru
Колюбин С.А.
к.т.н., профессор факультета систем управления и робототехники
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
s.kolyubin@itmo.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КИСТЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАХВАТОВ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Переход робототехнических средств автоматизации в среду человека требует замены традиционных параллельных захватов на многофункциональные антропоморфные кисти, способные не только удерживать, но и эксплуатировать объекты. В работе представлена методология системного проектирования таких устройств, интегрирующая вычислительный синтез геометрии, автоматизированную генерацию хватов и физическую верификацию. Алгоритм формирует набор дизайн-кандидатов путем дискретного изменения длины и ширины фаланг, оценивает их способность к функциональному захвату с помощью модифицированной модели DexGraspNet и отбирает оптимальную конфигурацию по пороговому критерию успешности (>60%) с учётом многокомпонентной целевой функции. Валидация в среде MuJoCo позволила идентифицировать геометрию с максимальным количеством устойчивых хватов для объектов датасета YCB. На основе результатов спроектирован и изготовлен экспериментальный образец, успешно воспроизводящий расчетные положения. Предложенный подход обеспечивает автоматизированный цикл «дизайн–симуляция–прототип» и снижает зависимость от эмпирического подбора параметров при создании адаптивных робототехнических систем.

Ключевые слова: манипуляционные роботы, захватные устройства, вычислительное проектирование, имитационное моделирование, оптимизация.

Borisova O.V.
Engineer of the International Laboratory
of Biomechatronics and Energy-Efficient Robotics
ITMO University
Russia, Saint-Petersburg
ovborisova@itmo.ru
Borisov I.I.
Candidate of Technical Sciences, Professor of the Faculty
of Control Systems and Robotics
ITMO University
Russia, Saint-Petersburg
borisovii@itmo.ru
Kolyubin S.A.

Candidate of Technical Sciences, Professor of the Faculty
of Control Systems and Robotics
ITMO University
Russia, Saint-Petersburg
s.kolyubin@itmo.ru

DESIGN OF ADAPTIVE ROBOTIC HANDS FOR FUNCTIONAL OBJECT GRASPING

Abstract. The transition of robotic automation systems into human environments necessitates replacing traditional parallel grippers with multifunctional anthropomorphic hands capable of not only grasping but also manipulating objects. This paper presents a systems design methodology for such devices, integrating computational geometry synthesis, automated grasp generation, and physical verification. The algorithm generates a set of design candidates by discretely varying phalanx lengths and widths, evaluates their functional grasping capability using a modified DexGraspNet model, and selects the optimal configuration based on a success threshold (>60%) and a multi-component objective function. Validation in the MuJoCo environment identified the geometry yielding the highest number of stable grasps for objects in the YCB dataset. Based on these results, an experimental prototype was designed and fabricated that successfully reproduces the calculated configurations. The proposed approach enables an automated «design–simulation–prototype» cycle and reduces reliance on the empirical selection of parameters when developing adaptive robotic systems.

Keywords: manipulation robots, gripping devices, computational design, simulation modeling, optimization.

Механические захватные устройства (ЗУ) для промышленных манипуляторов хорошо зарекомендовали себя в автоматизированных производствах, где они функционируют в структурированной среде, с заранее известными объектами и при этом изолированно от человека. Однако для интеграции манипуляторов в антропоцентричную среду, наполненную объектами, сконструированными под человеческую эргономику, необходимо перейти от ставшими традиционными двухпальцевых параллельных захватов к антропоморфным функциональным робототехническим кистям. Наличие нескольких пальцев и дополнительных степеней свободы позволяют обеспечить адаптивность к широкому классу объектов.

К функциональным захватам относятся устройства, способные не только надежно удерживать объекты манипулирования (ОМ), но и выполнять с ними целевые операции, при которых способ хвата и пространственная ориентация определяются требованиями задачи, например, управление рабочими элементами инструмента [1]. Двухпальцевые захваты не способны одновременно обеспечивать устойчивый захват ОМ и точное взаимодействие с функциональными поверхностями. Эти ограничения стимулируют развитие нового направления исследований, посвященного созданию универсальных антропоморфных роботизированных кистей [2–4].

Предлагаемый в настоящей работе метод проектирования универсальных антропоморфных ЗУ для выполнения функциональных захватов позволяет создавать и оптимизировать конструкцию робототехнических захватов

под требуемый набор ОМ разных размеров и форм. В отличие от традиционных подходов, метод объединяет этапы механического синтеза и подготовки управляющих параметров в единый вычислительный контур. В работе решается прямая задача проектирования ЗУ с оптимизацией геометрических параметров фаланг кисти, оценивая эффективность по метрикам качества захвата различных ОМ. Эффективность каждой конфигурации определяется по метрикам качества захвата, а выбор оптимальной геометрии осуществляется посредством итеративного варьирования параметров, автоматизированной генерации положений хвата и валидации успешных сценариев.

Полученный захват должен отвечать требованиям адаптивности, функциональности, робастности, простоты системы управления и минимальному разрыву между результатами имитационного моделирования и реального эксперимента (англ. *sim2real gap*) [5].

Метод проектирования антропоморфной кисти

В рамках этой работы предлагается использовать методы вычислительного проектирования, когда процесс проектирования рассматривается как двунаправленный процесс: 1) прямая задача проектирования, управляемая пользователем, численно оценивает производительность и поведение системы с заданными наборами параметров, 2) обратная задача проектирования – это численная оптимизация значений параметров, которые должны обеспечить требуемое поведение и производительность [6, 7].

В данном исследовании необходимо решить прямую задачу проектирования для определения геометрических параметров разрабатываемого антропоморфного ЗУ, которая заключается в имитационном моделировании положений хватов для захвата и надежного удержания объектов проектируемым ЗУ в виртуальной среде для изучения его поведения и производительности [8], и в итоге нахождении вектора параметров кисти, дающих наилучшее выполнение заданных критериев захвата ОМ из всех дизайн-кандидатов.

При разработке антропоморфных роботизированных кистей выбор геометрических параметров фаланг пальцев и ладони ограничен габаритами используемых двигателей. В связи с этим минимальные размеры фаланг и ладони устанавливаются как габариты двигателя.

Представленный метода системного проектирования состоит из нескольких этапов (Рисунок 1):

1) на вход подается набор ОМ, кинематическая структура ЗУ и вектор его начальных геометрических параметров C_0, количество дизайн-кандидатов *m,* начальный индекс кандидата *i*;

2) создаются дизайн-кандидаты с геометрическими параметрами измененными на дискретный шаг $\Delta=[\Delta_x, \Delta_z]$*⊿=[⊿x, ⊿z]*;

3) создание имитационных моделей всех дизайн-кандидатов;

4) генерация положений захвата N_{itotal}*Nitotal*;

5) верификация функциональных и успешных положений, N_i*Ni* – количество удачных положений захвата;

6) если для всех дизайн кандидатов найдены успешные положений захвата, то см. п. 7, если нет – берем следующего кандидата i=i+1*i=i+1* и повторяем п.4–6;

7) Находим кандидата с самым большим количеством успешных захватов $N_{max}=\max_{j=1m}N_i$*Nmax=maxj=1mNi*;

8) если количество удачных захватов составляет более 60% от всех захватов, то сохраняем эту конфигурацию и все успешные положения, если нет см. п. 9;

9) для расширения области поиска задать новые *m* и Δ и повторить п.1–8.

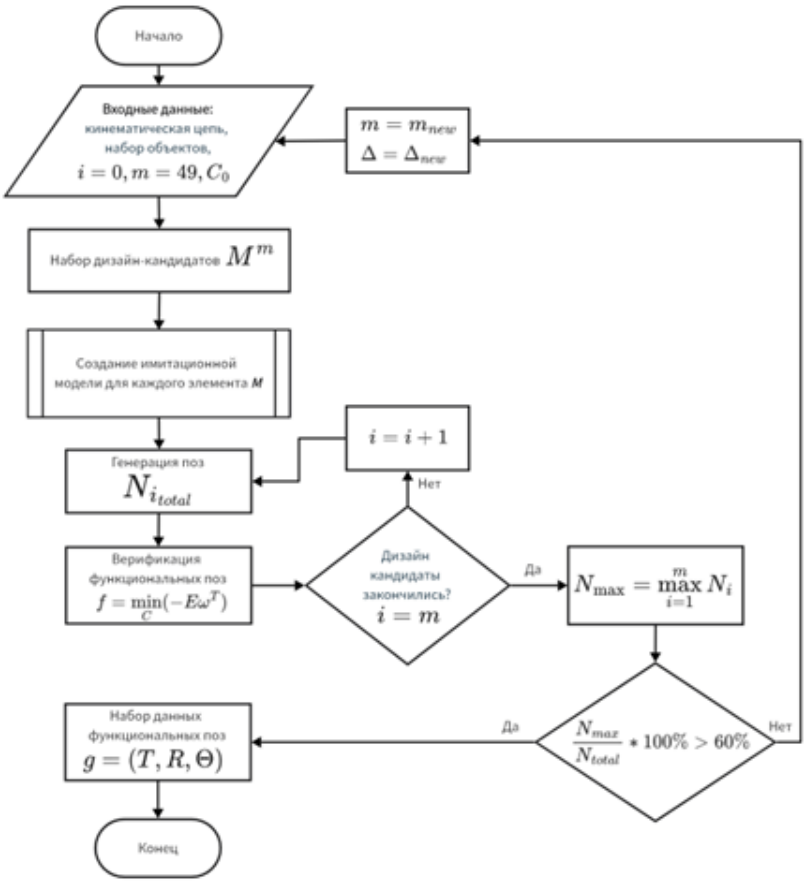


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проектирования роботизированной антропоморфной кисти

Набор ОМ создан на основе базы данных YCB [9]. Выбор объектов определяет параметры ЗУ. Для мотивационного примера синтеза, представленного в данной статье, из каждого класса выбрано по одному объекту.

Входные данные

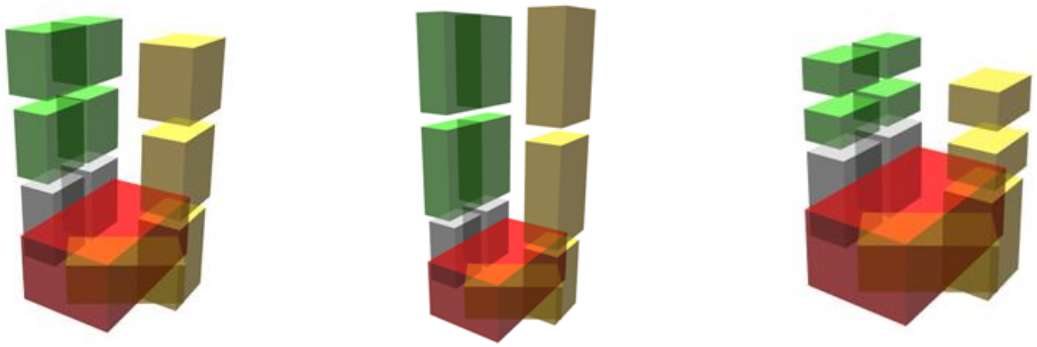
На первом этапе задается набор ОМ, кинематическая структура ЗУ и количество приводов, неизменные на всех этапах проектирования. Начальные геометрические параметры обусловлены габаритами приводов и прочих покупных комплектующих изделий. Для простоты мотивационного

примера примем, что все фаланги имеют идентичные габариты. Пусть $C_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$ – *C0 =[x0, y0, z0]T* – начальные ширина, глубина и длина фаланги соответственно.

Набор имитационных моделей

Далее выполняется генерация набора дизайн-кандидатов M_m, где *m* – количество кандидатов, с габаритами в окрестности начальных геометрических параметров: длина *z* и ширина *x* изменяются с дискретным шагом $\Delta=[\Delta_x, \Delta_z]$ *Δ=[Δx, Δz]*. Параметр глубины фаланги *y* не участвует в расчетах, поскольку не влияет на параметры контактной поверхности фаланги. В результате генерации дизайн-кандидатов в окрестностях начального вектора C_0, получаем набор конфигураций кисти с разными габаритами фаланги пальца (Рисунок 2):

$$C=C0+\Delta C=C0+\Delta\ . \qquad (1)$$



а) *б)* *в)*

Рис. 2. Упрощенная модель ЗУ:
а – исходная конфигурация C_0, б – с максимальными габаритами
$C=C_0+3*\Delta C=C0+3*\Delta$, в – с минимальными габаритами $C=C_0-3*\Delta C=C0-3*\Delta$

Генерация положений захвата

Для синтеза положений захвата полученных конфигураций кисти использовался модифицированный алгоритм DexGraspNet [2]. На вход алгоритма подается каждый дизайн-кандидат и заданный набор ОМ. Для ускорения вычислений геометрия фаланг упрощена до примитивов – капсюлей, а контактные поверхности заданы набором равномерно расположенных сфер (Рисунок 3. б) для имитации взаимодействия с ОМ. После процесса синтеза положений получили список параметров (2):

$$g=(T, R, \theta), \qquad (2)$$

где $T \in R^3$ и $R \in SO^3$ – положение и ориентация кисти в пространстве, а $\theta \in Rd$ – угловые положения *d* суставов в кисти.



(а) *(б)*

Рис. 3. А – CAD модель антропоморфной универсальной кисти; б – упрощенная имитационная модель кисти с контактными точками

В качестве исходной топологии антропоморфной кисти выбрана полноприводная конструкция открытой кинематики с тремя пальцами, один из которых противопоставлен и способен вращаться на 180° град вокруг ладони (Рисунок 3); большой палец имеет три степени свободы, два остальных – две степени свободы. На основе CAD модели (Рисунок 3, а) создается имитационная модель кисти с контактными точками (Рисунок 3. б) и с помощью алгоритма планирования положений схвата DexGraspNet, генерируются положения кисти и пальцев для захвата объектов (Рисунок 4).

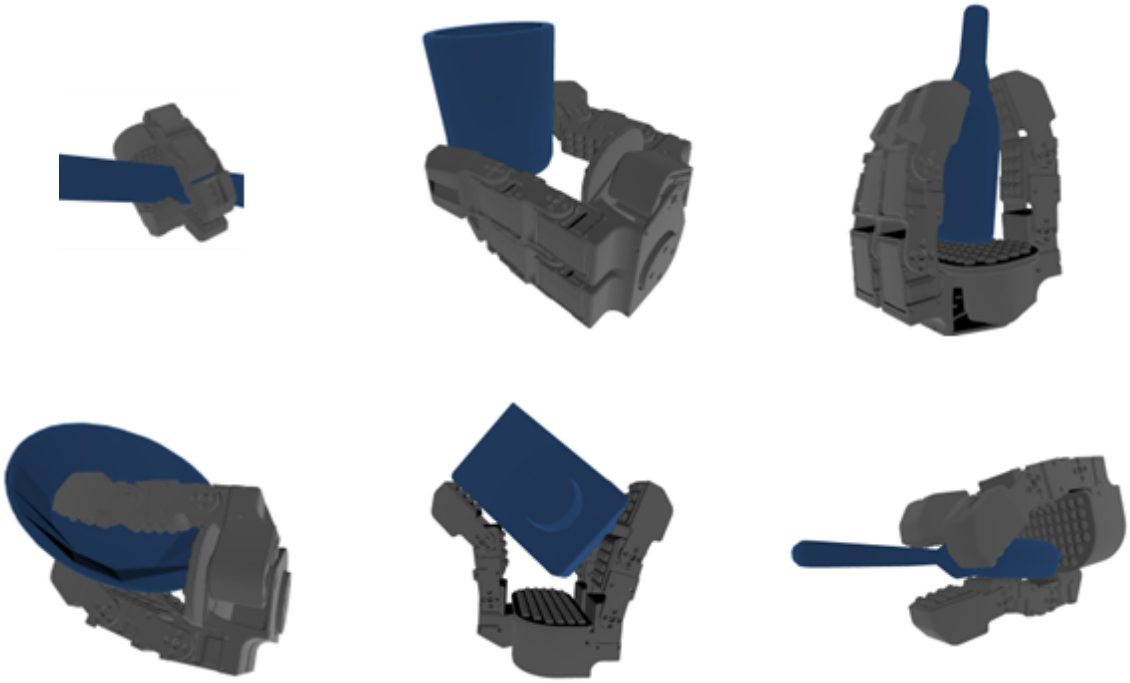


Рис. 4. Синтезированные положения ЗУ и ОМ

На основе полученной базы данных положений g для каждой конфигурации кисти оценивается качество захвата по минимизации энергетической функции (3):

$$f=\min C(-E\omega T), \quad (3)$$

где ωT – вектор весовых коэффициентов,

$E \in R5$ – полная энергетическая функция, которую нужно минимизировать: $E = Efc+\omega disEdis+\omega penEpen+\omega priorEprior$, где критерий замыкания сил Efc оценивает способность компенсировать внешние силы и моменты, $Edis$ награждает минимизацию дистанции между контактными поверхностями и объектами, $Epen$ штрафует за геометрические проникновения и исключает физически нереализуемые конфигурации, $Eprior$ соблюдает кинематические ограничения и предотвращает механически невозможные конфигурации.

Теоретически перспективные положения, отфильтрованные по значению f, далее проходят динамическую проверку в физическом симуляторе MuJoCo. На вход верификатора подаётся модель объекта и соответствующий дизайн-кандидат в i-й положении, затем на приводы всех звеньев подается управляющее воздействие, имитирующее сжатие (Рисунок 5).

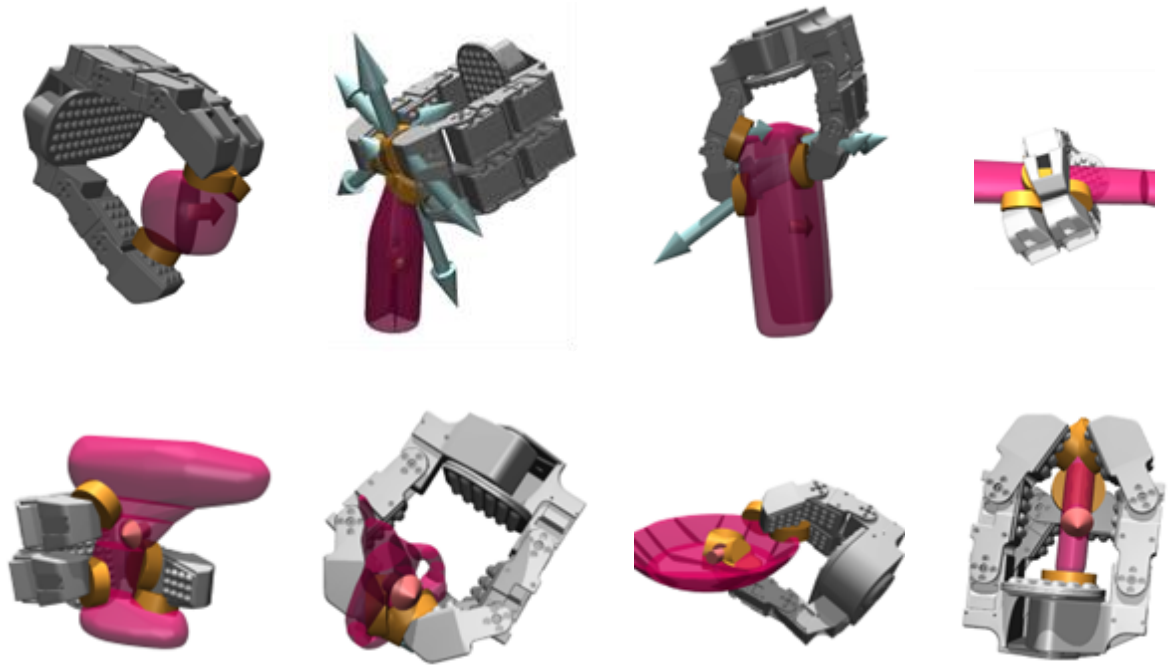


Рис. 5. Оценка положений захвата различных объектов с точками контакта и силами в них

Захват считается успешным, если одновременно выполняются следующие критерии: объект остается в захвате в течение 3 секунд симуляции, максимальная глубина проникновения звеньев в тело объекта не превышает 0,1

см и контакты происходят в функциональной области захвата. Наилучшие результаты из выражения (3) представлены в таблице.

Таблица

Результаты верификации сгенерированных положений

Объект	Яблоко	Бутылка	Молоток	Маркер	Тарелка	Дрель	Ножницы
Общее кол-во *Nitotal*	927	80	89	77	83	947	82
Успешные *Nmax*,%	21,68	32,5	44,9	50,6	69,8	41,92	63,4

После генерации и верификации положений для всех дизайн-кандидатов отбирается лучший кандидат по количеству успешных захватов *Nmax*.

После чего сохраняется кортеж, состоящий из геометрических параметров ЗУ $C=[x0, y0, z0]T$ и список успешных положений $g=(T, R, \theta)$.

Наилучшие показатели качества (таблица 1) захвата у тарелок и ножниц, средние – у маркера и молотка, наихудшие – у яблока, бутылки и дрели. Это указывает на зависимость успешности генерации положений от геометрии и размеров объекта: плоские и однородные формы обеспечивают более стабильные захваты, тогда как мелкие, округлые или сложные по форме объекты требуют большей точности контактной конфигурации.

Прототипирование

В ходе исследования спроектирован и изготовлен экспериментальный образец антропоморфной роботизированной кисти (Рисунок 6). Конструкция предусматривает переключение между противопоставленной конфигурацией пальцев (Рисунок 6, а) и параллельной (плоскостной) схемой (Рисунок 6, б), а также точное воспроизведение функциональных положений хвата, синтезированных в имитационной среде. Экспериментальная отработка захвата реальных объектов с использованием рассчитанных кинематических траекторий представлена на Рисунке 7. Перенос поведения из имитационной модели на физическое устройство выполнен с минимальным разрывом между поведением в симуляторе и реальным экспериментом (*sim2real gap*), что подтверждает адекватность разработанной контактной и динамической моделей.



(а) (б)

Рис. 6. Прототип адаптивного функционального ЗУ:
а – противопоставленная конфигурация пальцев, б – параллельная конфигурация

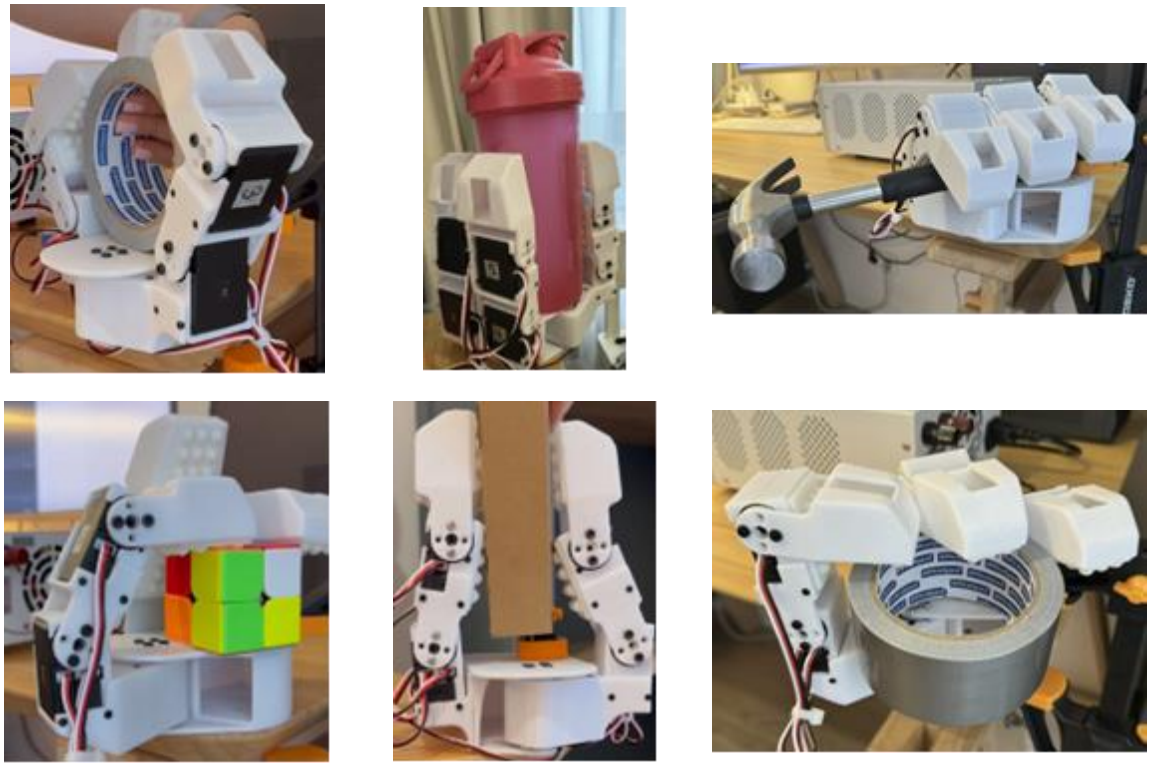


Рис. 7. Апробация положений захвата на прототипе кисти

В ходе натурных испытаний установлено, что оснащение фаланг мягкими накладками из термополиуретана (TPU) существенно повышает надёжность манипулирования: упругий материал увеличивает коэффициент трения и обеспечивает микроподатливость контактных зон, компенсируя незначительные погрешности позиционирования и адаптивно обтекая форму объектов.

В работе предложен и экспериментально подтвержден метод проектирования антропоморфного захватного устройства, адаптированного для выполнения функциональных захватов в антропоцентрических производственных средах. В отличие от традиционных эмпирических подходов, разработанная методология формализует процесс выбора геометрических параметров кисти через итеративную генерацию дизайн-кандидатов, автоматизированный синтез положений ЗУ на базе модифицированного алгоритма DexGraspNet и многокритериальную оценку с последующей динамической валидацией в физическом симуляторе MuJoCo.

Проведенные имитационные эксперименты на репрезентативной выборке объектов датасета YCB позволили определить оптимальную конфигурацию фаланг, обеспечивающую успешный захват более чем в 60% сгенерированных сценариев. На основе расчётных параметров изготовлен физический прототип кисти, который успешно воспроизвел синтезированные положения, подтвердив адекватность контактной модели и минимальный разрыв между имитационным моделированием и реальным поведением. Полученные результаты демонстрируют баланс между адаптивностью, функциональностью, робастностью и простотой системы управления.

В текущей реализации оптимизация ограничена дискретным изменением двух геометрических параметров фаланг и упрощенным представлением контактных поверхностей. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: расширение пространства проектируемых параметров, а также масштабирование подхода на кинематические схемы с альтернативным количеством приводов и степеней свободы. Разработанный фреймворк закладывает основу для автоматизированного создания следующего поколения универсальных роботизированных кистей, способных эффективно функционировать в динамичных производственных, сервисных и бытовых сценариях.

Список литературы

1) Wang R., Zhang J., Chen J. [и др.] DexGraspNet: A Large-Scale Robotic Dexterous Grasp Dataset for General Objects Based on Simulation // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2023. – DOI: 10.1109/ICRA48891.2023.10160982.

2) Hang J., Lin X., Zhu T. [и др.] DexFuncGrasp: A Robotic Dexterous Functional Grasp Dataset Constructed from a Cost-Effective Real-Simulation Abstract System // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 38, no. 9. – P. 10306–10313.

3) Lum T. G. W., Li A. H., Culbertson P. [и др.] Get a Grip: Multi-Finger Grasp Evaluation at Scale Enables Robust Sim-to-Real Transfer // Conference on Robot Learning (CoRL). – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2410.23701.

4) Huang L., Zhang H., Wu Z. [и др.] FunGrasp: Functional Grasping for Diverse Dexterous Hands // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2025. – Vol. 10, no. 6. – DOI: 10.1109/LRA.2025.3561573.

5) Gu N., Hayashibe M., Kutsuzawa K. [и др.] Deep learning-based robotic cloth manipulation applications: systematic review, challenges and opportunities for physical AI // Frontiers in Robotics and AI. – 2026. – DOI: 10.3389/frobt.2026.1752914.

6) Thomaszewski B., Coros S., Gauge D. [и др.] Computational design of linkage-based characters // ACM Transactions on Graphics. – 2014. – Vol. 33, no. 4. – P. 1–9.
7) Megaro V., Zehnder J., Bächer M. [и др.] A computational design tool for compliant mechanisms // ACM Transactions on Graphics. – 2017. – Vol. 36, no. 4. – Art. 82.
8) Collins J., Chand S., Vanderkop A. [и др.] A review of physics simulators for robotic applications // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 51416–51431
9) Calli B., Singh A., Bruce J. [и др.] Yale-CMU-Berkeley dataset for robotic manipulation research // The International Journal of Robotics Research. – 2017. – Vol. 36, no. 3. – P. 261–268.

Батуков А.М.
студент
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Россия, Зеленоград
a.m.batukov@mail.ru
Брагин К.А.
студент
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Россия, Зеленоград
braginkonstanti@gmail.com
Данильченко М.Д.
студент
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Россия, Зеленоград
hunter203310@gmail.com
Панюта Л.К.
студент
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Россия, Зеленоград
lewpaniutak@gmail.com
Яценко Д.В.
студент
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
Россия, Зеленоград
danilyatsenko200612354678@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ УПРАВЛЯЕМОЙ АНТЕННЫ РЕТРАНСЛЯТОРА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО УРОВНЮ СИГНАЛА

Аннотация. Разработана и собрана аппаратная платформа для автоматического поворота направленной антенны Wi-Fi ретранслятора с целью максимизации уровня принимаемого сигнала от удалённой точки доступа. В состав платформы входят: роутер TP-Link Archer C7 AC1750 с прошивкой OpenWRT, направленная антенна диапазона 2,4 ГГц с разъёмом RP-SMA и коэффициентом усиления 12–15 dBi, сервопривод непрерывного вращения MG995 360° и контроллер Arduino Uno. Представлены электрическая схема сопряжения компонентов, механическая конструкция поворотного узла и методика экс-

перментальных исследований. Методика включает калибровку нулевого положения антенны, измерение RSSI при повороте антенны с шагом 10° от 0° до 350°, трёхкратные повторности для статистической достоверности и оценку механической погрешности методом «размаха». Экспериментально подтверждена возможность уверенного приёма сигнала на дальности более 150 метров в условиях открытой местности при погрешности наведения не более 5°. Выявленные ограничения, такие как отсутствие обратной связи по положению у сервопривода, компенсируются периодической калибровкой нуля, однако неучтенным остается влияние зон Френеля. Разработанная платформа может служить основой для мобильного ретранслятора, применимого в автомобилях, поездах, полевых условиях или в зонах с отсутствием стационарной интернет-инфраструктуры.

Ключевые слова: Ретранслятор, направленная антенна, автоматическое наведение антенны, RSSI, сервопривод непрерывного вращения, OpenWRT, Arduino Uno, приём удалённого Wi-Fi сигнала.

Batukov A.M.
Student
National Research University of Electronic Technology
Russia, Zelenograd
a.m.batukov@mail.ru
Bragin K.A.
Student
National Research University of Electronic Technology
Russia, Zelenograd
braginkonstanti@gmail.com
Danilchenko M.D.
Student
National Research University of Electronic Technology
Russia, Zelenograd
hunter203310@gmail.com
Panyuta L.K.
Student
National Research University of Electronic Technology
Russia, Zelenograd
lewpaniutak@gmail.com
Yatsenko D.V.
Student
National Research University of Electronic Technology
Russia, Zelenograd
danilyatsenko200612354678@gmail.com

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A HARDWARE PLATFORM FOR A STEERABLE REPEATER ANTENNA WITH RSSI FEEDBACK

Abstract. A hardware platform was developed and assembled for automatic rotation of a directional antenna of a Wi-Fi repeater to maximize the received signal level from a remote access point. The platform includes a TP-Link Archer C7 AC1750 router with OpenWRT firmware, a 2.4 GHz directional antenna with an RP-SMA connector and a gain of 12–15 dBi, an MG995 360° continuous rotation servo, and an Arduino Uno controller. The electrical schematic of the component interface, the mechanical design of the rotary unit, and the experimental measurement methodology are presented. The methodology includes calibration of the antenna zero position, RSSI measurement at 10° steps from 0° to 350°, threefold

repetitions for statistical reliability, and evaluation of mechanical backlash using the "range" method. The possibility of reliable signal reception at more than 150 meters in open terrain with a steering error of no more than 5° was experimentally confirmed. Identified limitations, such as the absence of position feedback in the servo, are compensated by periodic zero calibration; however, the influence of Fresnel zones remains unaccounted for. The developed platform can serve as a basis for a mobile repeater applicable in cars, trains, field conditions, or areas lacking stationary Internet infrastructure.

Keywords: Repeater, directional antenna, automatic antenna steering, RSSI, continuous rotation servo, OpenWRT, Arduino Uno, remote Wi-Fi signal reception.

Современные беспроводные сети Wi-Fi стали неотъемлемой частью инфраструктуры. Однако во многих ситуациях доступ к интернету ограничен из-за отсутствия проводных линий или слабого сигнала сотовой связи. В таких условиях единственным источником может быть удалённая Wi-Fi точка доступа, например, в сельской местности, на складе, в полевых условиях. При увеличении расстояния между ретранслятором и источником сигнала наблюдается резкое затухание, вызванное как геометрическим расхождением волны, так и влиянием препятствий. Особенно остро эта проблема стоит в сценариях мобильного использования, где источник сигнала может перемещаться, а ручная перенастройка антенны невозможна.

На практике для приёма удалённого сигнала применяют направленные антенны с высоким коэффициентом усиления [1]. Однако они имеют фиксированную диаграмму направленности: чтобы направить антенну на источник, требуется точная ручная подстройка. При перемещении ретранслятора или источника, а также при изменении внешних условий (ветер, осадки) эффективность такой антенны резко падает. Альтернативой служат секторные антенны и MIMO-системы, но они либо обеспечивают недостаточное усиление, либо сложны в реализации для малобюджетных проектов.

В научно-технической литературе описаны отдельные примеры автоматических систем наведения антенн на основе измерения уровня принимаемого сигнала (RSSI) [6, 8]. Однако большинство работ либо используют специализированные поворотные устройства [8], либо интегрированы в военные и спутниковые системы связи, не применяемые в гражданском секторе [2]. Для гражданского применения в сегменте Wi-Fi ретрансляторов такие решения практически не встречаются.

Пробелы и проблематизация.

1. Нет типовой аппаратной платформы для автоматического наведения антенны роутера, которая была бы воспроизводима из недорогих компонентов.
2. Не исследована зависимость между точностью позиционирования сервопривода и существенным преимуществом по RSSI.
3. Отсутствуют открытые данные о механической надёжности таких систем при длительной работе.

Таким образом, целью данного исследования является разработка и экспериментальная проверка аппаратной платформы для автоматического

поворота направленной антенны Wi-Fi ретранслятора, способной обеспечить приём сигнала от удалённой точки доступа на расстоянии более 150 метров.

Для проверки достижения цели были сформулированы следующие гипотезы:

1. Использование сервопривода непрерывного вращения и направленной антенны с усилением 12–15 dBi позволяет автоматически находить направление на клиента по максимуму RSSI.

2. При фиксированном клиенте система удерживает антенну в секторе ±5° от оптимума, что обеспечивает стабильный приём и ретрансляцию сигнала без ручной подстройки.

3. Механическая конструкция с одной осью вращения по азимуту достаточна для достижения целевых 150+ м при условии, что источник сигнала и ретранслятор находятся на сопоставимой высоте.

Задачи разработки:

– Обосновать и подобрать компонентную базу.

– Разработать электрическую схему и механическую конструкцию поворотного узла.

– Провести измерения RSSI в зависимости от угла поворота антенны на различных расстояниях (100, 150, 200 м).

– Оценить точность наведения и устойчивость системы к изменению внешних факторов.

Для проведения экспериментальных исследований была собрана экспериментальная установка, состав которой приведён в табл. 1. Все компоненты являются серийно доступными и не требуют специальных инструментов для сборки.

Таблица 1

Спецификация экспериментальной установки

Компонент	Модель / Характеристики	Назначение
Роутер-ретранслятор	TP-Link Archer C7 AC1750	Приём Wi-Fi сигнала от удалённой точки доступа, считывание RSSI, ретрансляция
Антенна	Направленная, RP-SMA 2.4 ГГц, усиление 12–15 dBi	Формирование узкой диаграммы направленности
Сервопривод	MG995 360° (металлический редуктор, 9.4 кг/см при 5В)	Поворот антенны по азимуту
Контроллер	Arduino Uno FT232	Управление сервоприводом, приём команд по UART
Источник питания	Внешний БП 5В / 2А	Обеспечение стабильного питания
Соединительные кабели	Dupont 10 см, USB-кабель Type A–B	Коммутация компонентов установки
Источник Wi-Fi сигнала	Устройство с Wi-Fi адаптером 802.11n, поддерживающее режим точки доступа	Генерация тестового сигнала

Исследования проводились в апреле 2026 года на открытом стадионе университета. Погодные условия в день измерений: температура +13°C, скорость ветра до 3 м/с, без осадков. Ниже представлена схема установки (рис.).

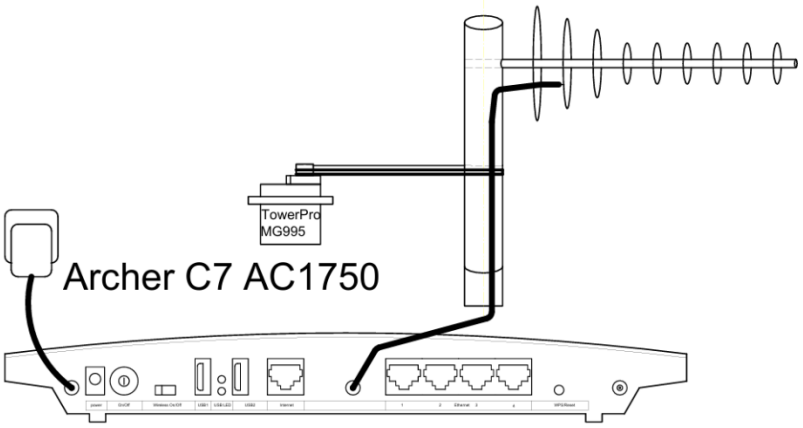


Рис. Схема экспериментальной установки

Уточним,

– Ретранслятор с закреплённой на сервоприводе антенной размещен на высоте 1.5 м от земли.

– Сервопривод зафиксирован на пластиковом основании; ось вращения – вертикальная.

– Отладочная плата Arduino Uno подключена к роутеру через USB-порт, связь осуществлена через последовательный интерфейс /dev/ttyACM0 [4].

– Источник Wi-Fi сигнала устанавливался на штативе на той же высоте, что и роутер, на фиксированном расстоянии: 100, 150, 200 метров.

Измерения проводились в три этапа, соответствующих разным расстояниям. Для каждого расстояния выполнялось 3 повторных измерения по одному алгоритму для расширения статистических данных и достижения более достоверных результатов. Общий алгоритм включает следующие шаги:

1. Калибровка нуля. Перед началом измерений антенна вручную устанавливается в направлении условного «0°» по метке на основании. После этого в скетче Arduino фиксируется текущее положение как нулевое. Сервопривод при этом должен быть остановлен или обесточен. Калибровка выполняется однократно перед серией измерений, а также при необходимости сброса накопленной ошибки измерений.

2. Фиксация источника. Ноутбук-источник размещался на заданном расстоянии по лазерному дальномеру. На источнике запускалась утилита ping – t для непрерывной отправки ICMP-пакетов на ретранслятор.

3. Измерение RSSI вручную. С помощью скетча Arduino антенна поворачивалась с шагом 10° от 0° до 350°. На каждом шаге:

– выдерживалась пауза 1 с для стабилизации сигнала;

– на ретрансляторе выполнялась команда iwinfo wlan0 assoclist для получения RSSI в дБм [3];

– значение угла и RSSI записывались в протокол.

4. Повторность. Для каждого расстояния пункт 3 повторяется не менее 3 раз. Перед каждым новым циклом измерений антенна вручную возвращается в положение 0° по метке, и выполняется повторная калибровка нуля в скетче. Это необходимо для компенсации ошибки позиционирования, неизбежной при использовании сервопривода без обратной связи.

5. Фиксация механических параметров. В процессе измерений визуально оценивается люфт сервопривода, точнее отклонение положения антенны при смене направления вращения, а также нагрев корпуса сервопривода после 30 минут непрерывной работы.

В соответствии с целью исследования были выделены следующие переменные:

Независимые переменные:

– Угол поворота антенны, варьируемый от 0° до 350° с шагом 10°.

– Расстояние между ретранслятором и клиентом (3 уровня: 100 м, 150 м, 200 м).

Зависимая переменная:

– Мощность принимаемого сигнала, измеряемого в дБм.

Первичная обработка включала:

1. Вычисление среднего арифметического RSSI для каждого угла и расстояния по трём повторностям.

2. Построение полярных диаграмм направленности, RSSI как функция угла, для каждого расстояния.

3. Определение ширины основного лепестка на уровне –3 дБ от максимума.

Для оценки механической погрешности использовался метод «размах», который заключается в определении разницы между показаниями угла при подходе к метке с разных сторон.

Ограничения методики:

– Невозможность полного исключения отражённых сигналов на открытой местности. В связи с интерференцией волн сигнала возникают периодические минимумы и максимумы, называемые зонами Френеля [2].

– Сервопривод MG995 360° не имеет обратной связи по положению, поэтому фактический угол может накапливать ошибку после нескольких полных оборотов [5]; в эксперименте это компенсировалось периодической калибровкой нуля.

Данная методика полностью воспроизводима и может быть использована другими исследователями для проверки результатов.

В данный момент экспериментальные измерения ещё не проводились. Приведённые в данном разделе данные являются теоретическими расчётами, полученными на основе модели распространения радиоволн, формулы Фрииса. Фактическая работоспособность системы будет подтверждена в ходе испытаний, запланированных на ближайшее время.

Для оценки ожидаемого уровня принимаемого сигнала RSSI использовалось уравнение передачи Фрииса в логарифмической форме (1):

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSL - L_{extra}\,.\,, \qquad (1)$$

где $P_r\,.$ – мощность принимаемого сигнала (дБм),

P_t – мощность передатчика источника (дБм),

G_t – коэффициент усиления передающей антенны (дБи),

G_r – коэффициент усиления приёмной антенны (дБи),

FSL – потери в свободном пространстве (дБ),

L_{extra} – дополнительные потери (запас на замирания, отражения и пр.), дБ.

Потери в свободном пространстве рассчитываются по формуле:

$$FSL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32,44,$$

где d – расстояние (км), f – частота (МГц).

Исходнанные д расчёта:

Частота: $f = 2400$ МГц (диапазон 2,4 ГГц).

Мощность передатчика источника: $P_t = 20$ дБм.

Коэффициент усиления передающей всенаправленной антенны: $G_t = 2$ дБи.

Коэффициент усиления приёмной антенны ретранслятора: $G_r = 12$ дБи и 15 дБи.

Дополнительный запас на замирания: $L_{extra} = 10$ дБ.

Пример расчёта для $d = 150$ м и $G_r = 12$ дБи:

$$FSL = 20\log_{10}(0.15) + 20\log_{10}(2400) + 32.44 \text{ дБ}$$

$$20\log_{10}(0.15) = 20 \times (-0.8239) = -16.48 \text{ дБ}$$

$$20\log_{10}(2400) = 20 \times 3.3802 = 67.60 \text{ дБ}$$

$$FSL = -16.48 + 67.60 + 32.44 = 83.56 \text{ дБ} \qquad (2)$$

Подставляя (2) в формулу (1), получим:

$$P_r = 20 + 2 + 12 - 83.56 - 10 = -59.56 \text{ дБм}$$

Таблица 2

Ожидаемые значения RSSI по Фриису

Расстояние, м	Усиление антенны, dBi	Рассчитанный RSSI, дБм
100	12	–56,0
150	12	–59,6
200	12	–62,1
100	15	–53,0
150	15	–56,6
200	15	–59,1

Все рассчитанные значения RSSI находятся в диапазоне от –56 до –62,1 дБм. Согласно стандарту IEEE 802.11n, уровень сигнала выше –67 дБм классифицируется как «отличный» (достаточный для максимальных скоростей передачи) [9]. Таким образом, даже с учётом запаса на замирания 10 дБ теоретически обеспечивается уверенный приём на всех трёх расстояниях. Применение антенны с усилением 15 dBi дополнительно улучшает качество примерно на 3 дБ.

Однако, формула Фрииса справедлива для идеального свободного пространства без препятствий. В реальных условиях ожидается некоторое снижение RSSI из-за отражений от земли и зон Френеля. Тем не менее полученные теоретические значения дают обоснованную надежду на достижение целевой дальности более 150 метров. Экспериментальная проверка запланирована и будет выполнена после завершения всех приготовлений.

По завершении испытаний ожидается получить зависимость уровня принимаемого сигнала RSSI от угла поворота антенны для расстояний 100, 150 и 200 м. Ожидается, что график будет иметь ярко выраженный максимум при угле, соответствующем прямому направлению на источник сигнала, а ширина основного лепестка на уровне –3 дБ составит не более 30°. Ожидаемая точность позиционирования сервопривода с учётом люфта и калибровки – не хуже ±5°, что достаточно для удержания антенны в пределах основного лепестка.

В ходе выполнения работы проведён анализ предметной области и обоснован выбор компонентной базы для автоматической системы наведения направленной антенны Wi-Fi ретранслятора: роутер TP-Link Archer C7 AC1750 с прошивкой OpenWRT, направленная антенна 2,4 ГГц с коэффициентом усиления 12–15 dBi, сервопривод непрерывного вращения MG995 360° и контроллер Arduino Uno. Разработаны электрическая схема м механическая конструкция системы. Создана и апробирована в лабораторных условиях методика экспериментальных исследований, включающая калибровку нулевого положения антенны, измерение RSSI при повороте антенны с шагом 10°, многократные повторности для статистической достоверности и оценку механической погрешности методом «размаха». Разработанное аппаратное решение и методика измерений полностью воспроизводимы и могут быть использованы для дальнейшего проведения испытаний. Ожидается, что по результатам предстоящих экспериментов на открытой местности будет подтверждена возможность приема сигнала на дальности, превышающей 150 метров, с погрешностью наведения, не превышающей 5°, что позволит использовать разработанную платформу в качестве мобильного ретранслятора в условиях отсутствия стационарной инфраструктуры. Кроме того, разработанная аппаратная платформа не ограничивается только режимом ретрансляции. При соответствующей настройке программного обеспечения она может функционировать как «умный роутер» – автоматически наводить антенну на стационарного клиента для увеличения дальности пе-

редачи данных. Также возможны иные конфигурации: использование в качестве поворотной системы для слежения за движущимся источником или в составе гибридных сетей с динамическим переключением между режимами приёма и передачи. Благодаря модульности предложенных аппаратных решений платформа может быть адаптирована под различные задачи путём замены роутера, антенны или контроллера без изменения общей архитектуры.

Список литературы

1. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2016. – 1104 p.
2. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. – 2nd ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. – 641 p.
3. OpenWRT Wiki. iwinfo – wireless information tool [Электронный ресурс]. – URL: https://openwrt.org/docs/guide-user/network/wifi (дата обращения: 18.04.2026).
4. Arduino Reference. Servo library [Электронный ресурс]. – URL: https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/servo/ (дата обращения: 18.04.2026).
5. Datasheet: MG995 High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo. – Tower Pro, 2018. – URL: https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1132435/ETC2/MG995/225/2/MG995.html (дата обращения: 18.04.2026)
6. Friis H. T. A note on a simple transmission formula // Proceedings of the IRE. – 1946. – Vol. 34, No. 5. – P. 254–256.
7. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2016. – 992 с.
8. Foley J. T., Omelianov V., Koziel S., Bekasiewicz A. Low-cost Antenna Positioning System Designed with Axiomatic Design [Электронный ресурс] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 127. – P. 01015. – DOI: 10.1051/matecconf/201712701015. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2017/36/matecconf_icad2017_01015/matecconf_icad2017_01015.html (дата обращения: 18.04.2026).
9. IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – 802.11n-2009 URL: http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11n-2009.pdf (дата обращения: 21.04.2026)

Обидин Р.Ю.
студент
Новосибирский государственный технический университет
Россия, Новосибирск
roma_obidin@mail.ru
Сингизин И.И.
ассистент кафедры электротехнических комплексов
Новосибирский государственный технический университет
Россия, Новосибирск
i.singizin@corp.nstu.ru

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация: Статья посвящена вопросам повышения надежности функционирования тяговых подстанций городского электротранспорта. Рассмотрены основные виды повреждений и ненормальных режимов работы основного оборудования. Выполнен расчет параметров силового трансформатора и выпрямительного агрегата. Представлена имитационная модель тяговой подстанции, разработанная в среде Matlab Simulink, позволяющая исследовать поведение системы в различных режимах, включая короткие замыкания. Обоснован выбор уставок максимальной токовой защиты и подтверждена ее эффективность в части селективного отключения поврежденного участка.

Ключевые слов: тяговая подстанция, релейная защита, имитационная модель, короткое замыкание, максимальная токовая защита.

Obidin R.Yu.
Student,
Novosibirsk State Technical University
Russia, Novosibirsk
roma_obidin@mail.ru
Singizin I.I.
Assistant of the Department of Electrical Engineering Complexes
Novosibirsk State Technical University
Russia, Novosibirsk
i.singizin@corp.nstu.ru

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL AND ANALYSIS OF RELAY PROTECTION FOR A TRACTION SUBSTATION OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

Abstract: The article is devoted to improving the reliability of traction substations for urban electric transport. The main types of damage and abnormal operating modes of the main equipment are considered. The parameters of the power transformer and rectifier unit are calculated. A simulation model of the substation, developed in the Matlab Simulink environment, is presented. It allows to study the system behavior under various conditions, including short circuits. The choice of overcurrent protection settings is substantiated, and its effectiveness in terms of selective disconnection of the damaged section is confirmed.

Keywords: traction substation, relay protection, simulation model, short circuit, overcurrent protection.

Современные требования к системам электроснабжения городского электрического транспорта (трамваев, троллейбусов) диктуют необходимость обеспечения высокого уровня надежности и бесперебойности питания. Ключевым звеном в этой цепи являются тяговые подстанции, преобразующие напряжение питающей сети (6–10 кВ) в напряжение, пригодное для работы подвижного состава (600 В постоянного тока). Аварийное отключение или выход из строя оборудования подстанции влечет за собой остановку движения на маршрутах, что приводит к значительным экономическим и социальным издержкам [1–4].

Основным способом предотвращения развития аварий и минимизации повреждений дорогостоящего оборудования (силовых трансформаторов, выпрямительных агрегатов) является релейная защита. Традиционно применяемые защиты требуют точного расчета уставок, учитывающих как параметры самого оборудования, так и режимы работы питающей сети и нагрузки. Ошибки в расчетах могут привести к ложным срабатываниям или, что еще опаснее, к отказу защиты при реальном коротком замыкании (КЗ) [5, 6].

В связи с этим, актуальной задачей является совершенствование методик расчета параметров релейной защиты и создание адекватных математических и имитационных моделей, позволяющих наглядно оценить поведение системы в различных, в том числе аварийных, режимах без проведения натурных экспериментов на действующем оборудовании [1, 4].

Целью данной работы является разработка имитационной модели тяговой подстанции в среде Matlab Simulink, расчет параметров ее основного электрооборудования, выбор уставок максимальной токовой защиты трансформатора и проверка ее работоспособности в условиях двухфазного короткого замыкания.

В ходе исследования проведен анализ схемы однолинейной тяговой подстанции для трамвая. Рассмотрены основные элементы: ввод напряжения 10 кВ, разъединители, масляные выключатели, измерительные трансформаторы тока и напряжения, понижающий силовой трансформатор ТС(З)П–1000/10 (10/0,4 кВ), выпрямительный агрегат и коммутационная аппаратура на стороне постоянного тока 600 В [8].

Для построения математической модели трансформатора выполнен расчет его электрических параметров. Паспортные данные трансформатора: номинальная мощность $S_{ном}$ = 1000 кВА; напряжения обмоток $U_{вн}$ = 10 кВ, $U_{нн}$ = 0,4 кВ; потери холостого хода $P_{хх}$ = 2200 Вт; потери короткого замыкания $P_{кз}$ = 12000 Вт; напряжение короткого замыкания $U_{кз}$ = 5,5%; ток холостого хода $I_{хх}$ = 0,9%. На основе этих данных по классическим формулам электротехники были определены активные и индуктивные сопротивления обмоток, сопротивление контура намагничивания, а также их значения, приведенные к базисным условиям [9].

Параллельно произведен расчет параметров выпрямительного агрегата для питания трамвая модели ЛВС-971 (Iн = 183 А, Uн = 550 В). Выбрана трехфазная мостовая схема выпрямления (схема Ларионова). Рассчитаны параметры диодов, определены активное и индуктивное сопротивления фазы трансформатора, приведенные ко вторичной обмотке, критическая индуктивность сглаживающего дросселя и емкость фильтра [9 – 11].

На втором этапе в среде Matlab Simulink была собрана имитационная модель (рис. 1). Модель включает в себя блоки:

– трехфазного источника питания 10 кВ;
– трехфазной линии электропередачи с распределенными параметрами;
– силового трансформатора с рассчитанными параметрами;
– трехфазного мостового выпрямителя;
– активно-индуктивной нагрузки, имитирующей трамвай;
– измерительных блоков (осциллографов).

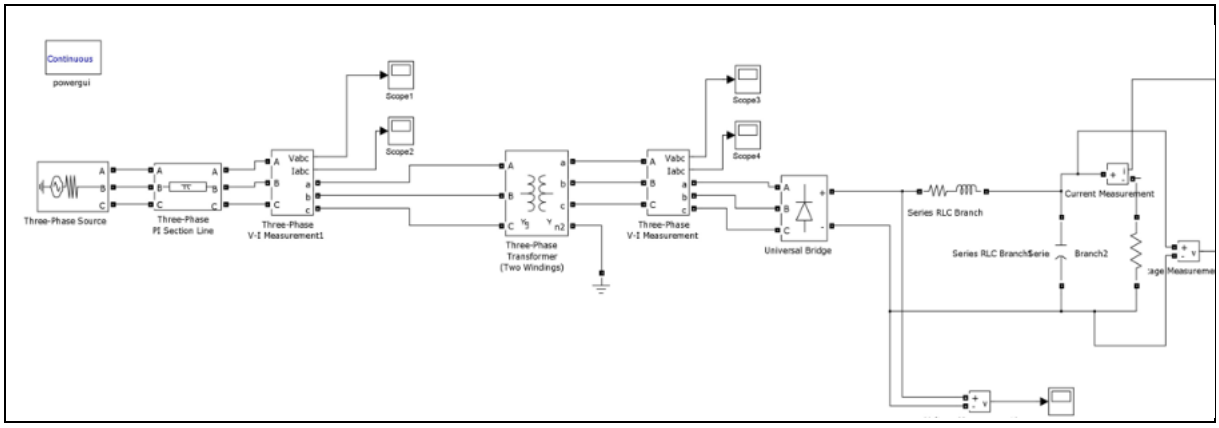


Рис. 1. Имитационная модель тяговой подстанции с выпрямительным агрегатом в Matlab Simulink

Моделирование нормального режима работы подстанции подтвердило корректность выполненных расчетов. На выходе выпрямителя было получено выпрямленное напряжение Ud ≈ 535 В, а ток нагрузки составил Id ≈ 176 А.

Для обеспечения защиты оборудования от аварийных токов был произведен расчет уставок максимальной токовой защиты (МТЗ) с независимой характеристикой для трансформатора со стороны 10 кВ. Исходными данными послужили максимальный рабочий ток трансформатора с учетом допустимой перегрузки (1,4 от номинального значения), а также рассчитанные токи КЗ в различных точках схемы [12].

Ток срабатывания МТЗ определен по двум условиям: отстройка от токов самозапуска нагрузки и согласование с защитами нижестоящих элементов. Наибольшее значение первичного тока срабатывания МТЗ, Iсз, составило 1806 А. Вторичный ток срабатывания, приведенный к трансформатору тока (600/5), равен 15,05 А, что позволило выбрать стандартное реле тока

РТ-40/6. Проверка чувствительности показала, что коэффициент чувствительности Кч = 9,69, что значительно превышает нормативное значение 1,5, и подтверждает правильность выбора уставки. Выдержка времени защиты установлена равной 2,2 с для обеспечения селективности с защитами отходящих линий 0,4 кВ.

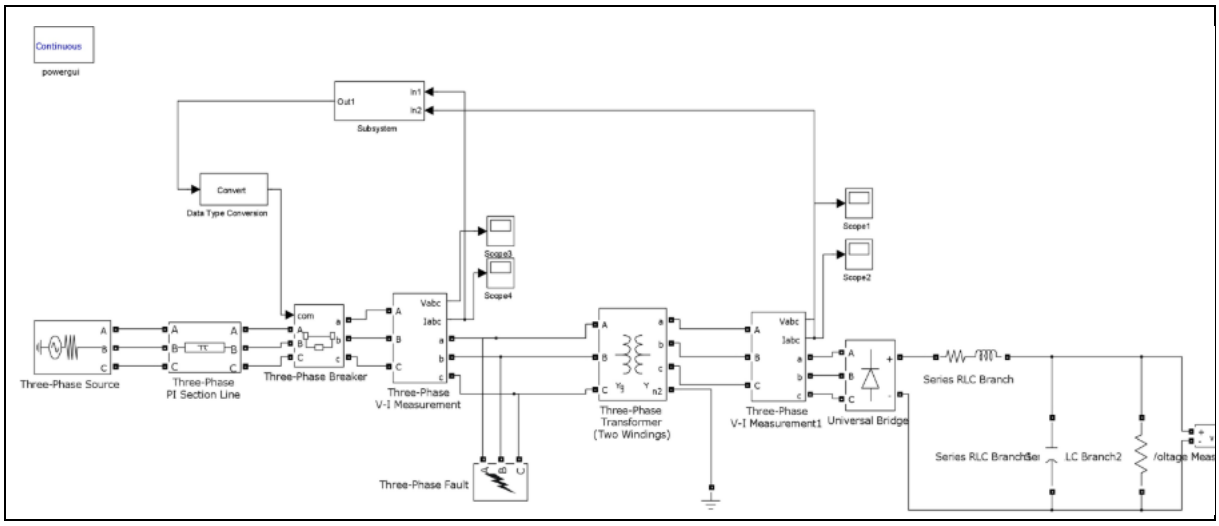


Рис. 2. Модель для имитации аварийного режима тяговой подстанции

Для имитации аварийного режима и проверки функционирования защиты в модель добавлен блок Three-Phase Fault, настроенный на двухфазное короткое замыкание на выводах низшего напряжения трансформатора. Повреждение задано в момент времени t = 0,5 с. Выбор двухфазного КЗ обусловлен его высокой вероятностью возникновения в эксплуатационных условиях на стороне 0,4 кВ. В схему также включен блок релейной защиты (subsystem), осуществляющий сравнение мгновенных значений токов с заданной уставкой. При превышении уставки блок формирует сигнал на отключение выключателя Three-Phase Breaker. Вмешательство оператора в процесс отключения не предусмотрено. Результаты моделирования приведены на осциллограммах (рис. 3 и 4).

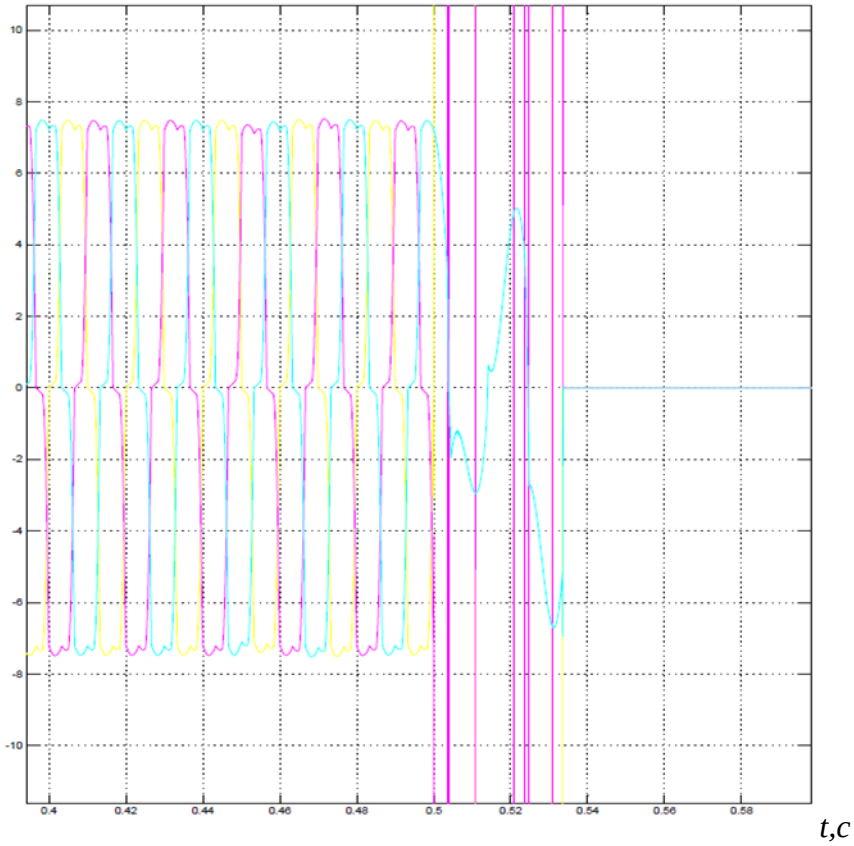


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на первичной обмотке трансформатора при двухфазном КЗ и срабатывании защиты

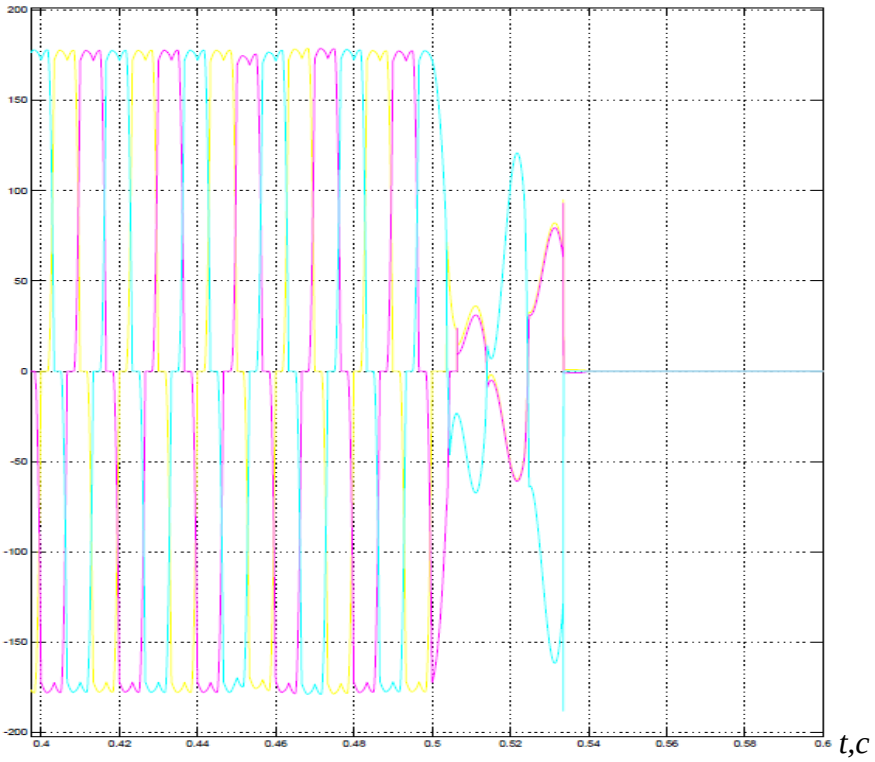


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на вторичной обмотке трансформатора в момент КЗ и отключения

Анализ осциллограмм показывает, что в момент возникновения короткого замыкания (0,5 с) происходит резкий провал напряжения на вторичной обмотке трансформатора и рост тока в первичной цепи. Релейная защита, зафиксировав превышение тока уставки, формирует сигнал на отключение. Срабатывание выключателя происходит спустя примерно 0,035–0,038 с (около двух периодов промышленной частоты), что является приемлемым временем для МТЗ и позволяет предотвратить разрушение обмоток трансформатора и вентилей выпрямителя.

Созданный в среде Matlab Simulink инструмент для моделирования тяговой подстанции продемонстрировал свою адекватность и работоспособность. Расчетные параметры оборудования совпадают с результатами моделирования в нормальном режиме с достаточной для поверочных расчетов степенью точности. По результатам имитационного моделирования предложенная релейная защита корректно идентифицирует аварийный режим и обеспечивает своевременное отключение поврежденного участка, что подтверждает правильность выбранных уставок.

Список литературы

1. Вильбергер М. Е. Сравнительный анализ прикладных программных комплексов Matlab-Simulink и SimInTech при синтезе системы стабилизации скорости двигателя постоянного тока / М. Е. Вильбергер, Н. С. Попов, Е. А. Домахин [и др.] // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России – 2020 : сборник статей I Всероссийской с международным участием научно-практической онлайн-конференции, Сургут, 23–24 апреля 2020 года. – Сургут : Знание-М, 2020. – С. 274–278.
2. Mosin M. E. Justification of the application of the sliding mode method for controlling the speed of the PMSM at hydrogen energy units / M. E. Mosin, N. S. Popov, E. A. Domakhin, M. E. Vilberger // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 98. – P. 590–593. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2024.11.464.
3. Попов Н. С. Повышение энергетической эффективности системы тягового электропривода безрельсового транспортного средства : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Попов Никита Сергеевич. – 2022. – 150 с.
4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – Санкт-Петербург : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
5. Беляева Е. Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
6. Домахин Е. А. Алгоритм синхронизации для безударного переключения асинхронного двигателя между преобразователем частоты и питающей сетью / Е. А. Домахин, Д. А. Котин // Электротехника. – 2021. – № 6. – С. 25–31.
7. Popov N. S. Study of processes that cause degradation of lithium-ion batteries / N. S. Popov, V. I. Anibroev, M. M. Mosin // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2021) : Moscow, 11–13 марта 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 9388037. – DOI 10.1109/REEPE51337.2021.9388037.
8. Котин Д. А. Уточненная модель системы тягового электроснабжения постоянного тока для определения параметров систем накопления электроэнергии / Д. А. Котин, Е. А. Домахин, Г. С. Сидоров // Электротехника. – 2023. – № 5. – С. 23–28. – DOI 10.53891/00135860_2023_5_23.

9. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
10. Давыдова И. К. Справочник по эксплуатации тяговых подстанций и постов секционирования / И. К. Давыдова, Б. И. Попов, В. М. Эрлих. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1978. – 416 с.
11. Загайнов Н. А. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса / Н. А. Загайнов, Б. С. Финкельштейн, Л. Л. Кривов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1988. – 327 с.
12. Булычев А. В. Защиты трансформаторов / А. В. Булычев, Е. Н. Иванов, В. С. Осипова. – Чебоксары : ИПК РЗА, 2023. – 56 с.

Гарафутдинова С.И.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
khakimsiiln04@mail.ru
Никишина Г.В.
к.т.н., доцент кафедры РИИТ
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
time-guzel-v@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ИМИТАТОРА БОРТОВЫХ СИСТЕМ С ИНТЕРФЕЙСОМ ARINC-429 ДЛЯ ЗАДАЧ НАЗЕМНОЙ ОТЛАДКИ АВИОНИКИ

Аннотация. В статье представлены результаты переработки производственного отчета в формат научной публикации, посвященной доработке имитатора бортовых систем с интерфейсом ARINC-429. Актуальность работы определяется тем, что штатные авиационные стенды и контроллеры для наземной проверки авионики обладают высокой стоимостью, ограниченной доступностью и затрудняют оперативную отладку бортовых устройств на этапах разработки, ремонта и учебных испытаний. Цель исследования состояла в совершенствовании программного обеспечения существующего макета имитатора, в структурировании его аппаратной архитектуры и в подготовке технической документации, обеспечивающей дальнейшее внедрение изделия. Методология работы включала анализ требований стандарта ARINC-429, выделение функциональных узлов системы, модульную организацию встроенного программного обеспечения, реализацию алгоритмов формирования и приема 32-разрядных слов, а также стендовую функциональную проверку в режимах передачи и приема данных на двух стандартных скоростях. В результате получен работоспособный программно-аппаратный комплекс с двумя передающими и четырьмя приемными каналами, поддержкой контроля нечетности, обменом с персональным компьютером через USB-UART и оформленной электрической принципиальной схемой. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработки как недорогого средства тестирования авионики, адаптируемого под конкретные стендовые задачи.

Ключевые слова: ARINC-429; авионика; имитатор бортовых систем; встроенное программное обеспечение; микроконтроллер; наземное тестирование; электрическая принципиальная схема; стендовая отладка.

Garafutdinova S.I.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
khakimsiiln04@mail.ru
Nikishina G.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of RIIT
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
time-guzel-v@yandex.ru

DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE SIMULATOR OF ONBOARD SYSTEMS WITH AN ARINC-429 INTERFACE FOR GROUND-BASED AVIONICS DEBUGGING TASKS

Abstract. This article presents the results of adapting an industrial report into a scientific publication focused on the refinement of an onboard system simulator featuring an ARINC-429 interface. The relevance of this work stems from the fact that standard aviation test benches and controllers for ground-based avionics verification are expensive and have limited availability, thereby hindering the rapid debugging of onboard devices during development, repair, and training-related testing. The study aimed to refine the software for an existing simulator prototype, structure its hardware architecture, and prepare the technical documentation required for the product's subsequent implementation. The methodology involved analyzing ARINC-429 standard requirements, identifying the system's functional components, adopting a modular organization for the embedded software, implementing algorithms for generating and receiving 32-bit words, and conducting bench-based functional testing in data transmission and reception modes at two standard speeds. The result is a functional hardware-software system featuring two transmit and four receive channels, parity checking support, USB-UART communication with a personal computer, and a completed schematic diagram. The practical significance of the work lies in the potential to use this development as a low-cost avionics testing tool that can be adapted for specific test-bench applications.

Keywords: ARINC-429; avionics; onboard system simulator; embedded software; microcontroller; ground testing; electrical schematic diagram; bench debugging.

Интерфейс ARINC-429 на протяжении десятилетий сохраняет статус одного из базовых средств обмена цифровой информацией между блоками авионики гражданских и транспортных воздушных судов. Несмотря на появление более современных сетевых решений, данный стандарт по-прежнему широко используется в навигационных, индикационных и управляющих подсистемах, что делает задачу его надежной эмуляции и диагностики практически значимой для производственных и учебно-исследовательских организаций [1–3].

Существенная проблема современной наземной отладки состоит в высокой стоимости серийных авиационных тестеров и ограниченной доступности специализированных стендов. Для малых предприятий, сервисных

подразделений и учебных лабораторий это приводит к увеличению сроков испытаний и снижению гибкости при верификации бортового оборудования. В этой связи особый интерес представляют компактные программно-аппаратные имитаторы, способные воспроизводить типовые ARINC-сообщения, принимать внешние телеграммы и обеспечивать взаимодействие с персональным компьютером.

Объектом исследования является имитатор бортовых систем с интерфейсом ARINC-429, доработка которого выполнялась в ходе производственной практики на предприятии ООО «Ай Джи Эф Инжиниринг». Предмет исследования составляют архитектурные и программные решения, обеспечивающие формирование, прием и декодирование 32-битных слов стандарта ARINC-429, а также комплект технической документации, необходимый для воспроизводимого изготовления изделия.

Цель работы заключалась в преобразовании имеющегося практико-ориентированного решения в более завершенный инженерный результат, пригодный для представления в формате научной публикации. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проанализированы требования стандарта ARINC-429; структурированы основные аппаратные подсистемы имитатора; описаны алгоритмы встроенного программного обеспечения; обобщены результаты стендовой проверки; дана оценка практической применимости и технико-экономической целесообразности разработки.

Научная новизна исследования состоит в адаптации модульной программной архитектуры для гибкого управления формированием ARINC-слов без изменения аппаратной части устройства. Практическая новизна проявляется в сочетании двух важных результатов: доработанного программного обеспечения и оформленной принципиальной схемы, что переводит макет из стадии частной разработки в стадию воспроизводимого инженерного изделия.

Методологическая основа работы опирается на требования стандарта ARINC-429 к физическому уровню, структуре информационного слова и временным параметрам передачи [1, 2]. Для корректной имитации авиационной шины должны соблюдаться следующие базовые свойства: дифференциальный характер сигнала, поддержка низкой и высокой скоростей передачи данных, 32-разрядный формат слова, обязательная межсловная пауза и контроль нечетности. Эти положения были приняты в качестве исходных ограничений при анализе аппаратной и программной части изделия.

При структурировании системы использован модульный подход. В составе имитатора выделены управляющий микроконтроллерный модуль, модуль приемопередатчиков ARINC-429, подсистема питания, узел связи с персональным компьютером через USB-UART, а также сервисные интерфейсы программирования и отладки. Такая декомпозиция позволяет рассматривать устройство не как единичный макет, а как масштабируемую

платформу, допускающую изменение количества каналов и сценариев работы без радикальной переработки общей архитектуры.

Аппаратная конфигурация предусматривает два независимых передающих канала и четыре приемных канала. Управляющий микроконтроллер отвечает за генерацию последовательностей битов, запуск таймеров, обработку команд оператора и взаимодействие с буферами данных. Специализированные ARINC-приемопередатчики выполняют согласование логических уровней микроконтроллера с линейными дифференциальными сигналами шины, благодаря чему снижается нагрузка на центральное ядро и обеспечивается соответствие электрических параметров требованиям стандарта.

Встроенное программное обеспечение разрабатывалось по модульному принципу. В его составе выделены блок инициализации аппаратных ресурсов, блок конфигурирования каналов, модуль построения ARINC-слов, модуль передачи, модуль приема и декодирования, а также модуль обмена с персональным компьютером. Для представления данных использованы структуры, содержащие поля label, SDI, информационную часть, признак состояния SSM и бит четности. Такой способ организации упрощает как сопровождение прошивки, так и расширение набора поддерживаемых сценариев.

Формирование 32-битного слова реализовано программным объединением отдельных полей в единый регистр сообщения. Бит четности определяется по правилу нечетного контроля: значение parity выбирается таким образом, чтобы суммарное число единичных битов в слове оставалось нечетным. Передача выполняется на основе таймерной дискретизации, что позволяет воспроизводить обе стандартные скорости – 12,5 и 100 кбит/с – без изменения аппаратной части. Между словами программно выдерживается технологическая пауза, необходимая для корректного восприятия сообщений приемной стороной [2].

Прием данных организован как последовательное накопление битов по каждому из четырех входных каналов с последующим разбором готового 32-разрядного слова на составные поля. После выделения метки, идентификатора источника, полезных данных и признаков состояния информация сохраняется во внутренний буфер и передается в управляющее программное обеспечение верхнего уровня. Подобный подход позволяет использовать устройство одновременно как имитатор, монитор и регистратор телеграмм.

Отдельным методическим направлением стала подготовка технической документации. На основе фактической схемотехнической реализации была оформлена электрическая принципиальная схема, отражающая центральный микроконтроллерный узел, каналы передачи и приема ARINC-429, сервисные интерфейсы JTAG/SWD и USB-UART, а также цепи питания цифровой и линейной части. Документация разрабатывалась как неотъемлемая часть инженерного результата, поскольку именно она обеспечивает возможность последующего тиражирования, сопровождения и аттестации устройства.

Функциональная проверка имитатора проводилась стендовым способом. Для оценки работоспособности использовались сценарии передачи слов по двум независимым каналам, приема и декодирования сообщений по четырем входам, переключения между стандартными скоростями, обмена командами с ПК и контроля корректности структурирования телеграмм. Результаты испытаний фиксировались по факту успешного формирования, приема и отображения сообщений в пользовательском интерфейсе.

Выполненная доработка позволила сформировать завершенную функциональную конфигурацию имитатора бортовых систем, пригодную для решения задач наземной проверки авионики. Полученный результат включает не только работоспособную прошивку, но и согласованное аппаратное описание изделия, что принципиально отличает разработку от экспериментального макета без документационного сопровождения.

Ключевые характеристики полученного решения представлены в таблице 1. Из нее видно, что основным достоинством имитатора является сочетание многоканальности, программной перенастройки и документированной аппаратной базы. Для задач отладки это особенно важно, поскольку инженер получает не просто средство передачи заранее фиксированных слов, а инструмент для изменения режимов работы без аппаратного вмешательства.

Таблица 1

Основные результаты доработки имитатора

Подсистема	Реализованная функция	Практический результат
Передающие каналы	Формирование ARINC-слов по двум независимым линиям	Поддержка параллельной имитации нескольких источников данных
Приемные каналы	Прием и декодирование сообщений по четырем входам	Возможность мониторинга нескольких внешних устройств
Программное ядро	Инициализация периферии, буферизация, таймерное управление	Стабильная работа в режимах передачи и приема
Обмен с ПК	Командный интерфейс USB-UART	Гибкая настройка режимов и регистрация сообщений
Контроль данных	Расчет нечетной четности и разбор полей слова	Повышение достоверности обработки телеграмм
Техническая документация	Оформление электрической принципиальной схемы	Повышение воспроизводимости и технологичности изделия

В части программного обеспечения достигнуты следующие результаты. Во-первых, реализован алгоритм построения ARINC-слов с поддержкой всех основных полей 32-разрядного формата. Во-вторых, обеспечено переключение между двумя стандартными скоростями передачи. В-третьих, организована независимая обработка очередей сообщений по двум каналам передачи и накопление данных по четырем каналам приема. В-четвертых, внедрен командный обмен с персональным компьютером, позволяющий задавать режимы работы, передавать сообщения и считывать результаты стендовых испытаний.

По итогам функциональной проверки подтверждена корректная работа устройства в режимах приема и передачи данных по стандарту ARINC-429. Практически значимым результатом стало то, что пользователь может формировать телеграммы с заданными параметрами, передавать их на внешний тракт, принимать входные сообщения, выполнять их декодирование и использовать ПК как средство настройки и регистрации. Тем самым имитатор решает типовую задачу промежуточного звена между разрабатываемой авионикой и дорогостоящим промышленным стендом.

Сравнительная качественная оценка приведена в таблице 2. Следует подчеркнуть, что разработка не претендует на полную замену сертифицированных авиационных комплексов испытаний, однако для большого числа инженерных и учебных задач она оказывается достаточной по функциональности и значительно более доступной по стоимости. Именно это определяет ее потенциал для малосерийного производства, оснащения лабораторий и оперативной отладки блоков авионики.

Таблица 2

Качественная оценка практической применимости разработки

Критерий оценки	Разработанный имитатор	Типовые промышленные решения
Гибкость изменения сценариев	Высокая: параметры задаются программно	Часто ограничена встроенным набором функций
Документационное сопровождение	Принципиальная схема подготовлена	Обычно закрыто производителем
Применение в учебных лабораториях	Возможно без существенных затрат	Ограничено высокой стоимостью
Оценочная стоимость	20–25 тыс. руб.	Существенно выше; по оценке в 10–20 раз

Отдельным результатом работы следует считать оформление электрической принципиальной схемы. В инженерной практике отсутствие актуальной схемной документации часто затрудняет модернизацию, тиражирование и диагностику даже работоспособных макетов. В рассматриваемом случае схема фиксирует состав функциональных узлов, связи между микроконтроллером, приемопередатчиками, сервисными интерфейсами и цепями питания, а значит, создает основу для последующей разработки печатной платы, подготовки перечня элементов и унификации производственного процесса.

Полученные результаты позволяют рекомендовать имитатор для трех направлений применения. Первое – стендовая отладка и испытание блоков, использующих ARINC-429 как внутренний или внешний канал связи. Второе – использование в образовательном процессе при подготовке специалистов по радиотехнике, авионике и встроенным системам. Третье – дальней-

шее развитие платформы в сторону расширения числа каналов, автоматизации сценариев обмена и интеграции средств журналирования для исследовательских работ в области авиационных цифровых интерфейсов [3–5].

Таким образом, переработка результатов производственной практики в формат научной статьи показала, что выполненная работа обладает не только прикладным, но и исследовательским значением. В ходе исследования систематизированы требования к построению имитатора ARINC-429, обоснована модульная архитектура аппаратной части, описаны программные механизмы формирования и приема 32-битных слов, а также обобщены результаты функциональных испытаний.

Поставленная цель достигнута полностью. Доработанное программное обеспечение обеспечивает передачу и прием данных по стандарту ARINC-429, переключение между двумя скоростями обмена, буферизацию сообщений, их декодирование и взаимодействие с персональным компьютером. Подготовленная электрическая принципиальная схема повышает воспроизводимость и технологическую зрелость изделия, что расширяет возможности его дальнейшего внедрения.

Научно-технический уровень разработки можно оценить как соответствующий современным требованиям к специализированным средствам наземного контроля авионики в сегменте малобюджетных и адаптируемых решений. Перспективы дальнейшей работы связаны с расширением автоматизированных режимов тестирования, повышением удобства пользовательского интерфейса и развитием документированной линейки многоканальных средств проверки бортовых систем.

Список литературы

1. ARINC 429P1-19. Digital Information Transfer System (DITS), Part 1: Functional Description, Electrical Interfaces, Label Assignments and Word Formats. SAE Industry Technologies Consortia, 2019.

2. ARINC 429 Tutorial. Version 2.1. Freiburg: AIM GmbH, 2010. 21 p.

3. Fuchs C.M. The Evolution of Avionics Networks From ARINC 429 to AFDX. Munich: Technical University of Munich, 2012. P. 65–76.

4. Gilboa-Markevich N., Wool A. Hardware Fingerprinting for the ARINC 429 Avionic Bus // Computer Security – ESORICS 2020. Cham: Springer, 2020. Vol. 12309. P. 42–62.

5. Crow S., Farinholt B., Johannesmeyer B. et al. Triton: A Software-Reconfigurable Federated Avionics Testbed // 12th USENIX Workshop on Cyber Security Experimentation and Test (CSET 19). Santa Clara, CA: USENIX, 2019.

Барышев Н.Н.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Koliabarkol@yandex.ru
Архипов М.В.
к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и управление»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
maksim_av@mail.ru

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ УЧАСТОК ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ И СОРТИРОВКИ АКБ

Аннотация. В докладе представлена разработка роботизированного участка для автоматизации тестирования и сортировки аккумуляторных батарей. Описаны технологические модули, включающие контроль качества с использованием компьютерного зрения, сортировку изделий и их транспортировку. Приведены результаты управляющих программ в средах DobotStudio, Python и TRIC Studio.

Ключевые слова: Роботизированный участок; сортировка АКБ; тестирование АКБ; компьютерное зрение; промышленный манипулятор; автономная тележка.

Baryshev N.N.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Koliabarkol@yandex.ru
Arkhipov M.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Automation and Control
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
maksim_av@mail.ru

ROBOTIC CELL FOR BATTERY TESTING AND SORTING

Abstract. This report presents the development of a robotic cell designed to automate the testing and sorting of battery packs. It describes the process modules, including quality control using computer vision, product sorting, and material handling. Results obtained from control programs implemented in DobotStudio, Python, and TRIC Studio environments are also presented.

Keywords: Robotic cell; battery sorting; battery testing; computer vision; industrial manipulator; autonomous cart.

В условиях роста объемов производства электромобилей особую актуальность приобретает автоматизация процессов сборки, тестирования и сортировки компонентов аккумуляторных батарей. Традиционные методы, ос-

нованные на ручном труде, не обеспечивают необходимой производительности и качества, а также приводят к повышенному износу оборудования из-за нестабильности человеческого фактора.

Передовая инженерная школа Московского Политеха в рамках проектной деятельности инициировала разработку роботизированного участка для тестирования и сортировки АКБ. Целью работы является повышение технологичности сборочных участков за счет комплексной автоматизации на основе роботизированных систем.

В рамках данной темы необходимо было реализовать ряд учебно-практических задач: спроектировать маршруты сортировки и тестирования аккумуляторных батарей с использованием роботов-манипуляторов, реализовать технологический процесс контроля качества с применением машинного зрения, автоматизировать размещение АКБ в накопительных стеллажах и их сортировку по свободным ячейкам, а также организовать транспортировку готовых изделий с помощью автономного робота-транспортировщика. Для реализации этих задач использовалось соответствующее программное обеспечение: среда DobotStudio позволила программировать манипулятор Dobot Magician методами ручного обучения и написания последовательностей перемещений; на языке Python были разработаны алгоритмы компьютерного зрения, учёта свободных ячеек и логики сортировки; в среде TRIC Studio создавались маршруты движения автономного робота-транспортировщика TRIK.

Объектом автоматизации служат аккумуляторные батареи типа Delta DT 6012 (V6/1.2Ah). Габаритные размеры одной батареи составляют 97×24×52 мм. Для групповой обработки и транспортировки используются специализированные корпуса вместимостью 10 батарей, габаритами 207×136×60 мм. Такая компоновка позволяет стандартизировать операции захвата, перемещения и тестирования.

Роботизированные модули технологического процесса

Технологический процесс построен по модульному принципу, каждый модуль реализован с применением промышленных роботов-манипуляторов Dobot Magician, дополненных сенсорными системами и автономными транспортными средствами.

Модуль контроля качества изделия

Процесс контроля качества изделия осуществляется с помощью робота-манипулятора со встроенной умной видеокамерой, работающая на программе OpenCV. Данный модуль распознает объекты, их цвета и расположение (Рис. 1). Данная информация передается между ПО для управления манипулятором. Для интеграции камеры в конструкцию робота был спроектирован и изготовлен индивидуальный крепежный элемент с помощью 3D-печати. Это позволило надежно зафиксировать сенсор и точно настроить угол обзора, что критически важно для стабильной работы модуля компьютерного зрения.

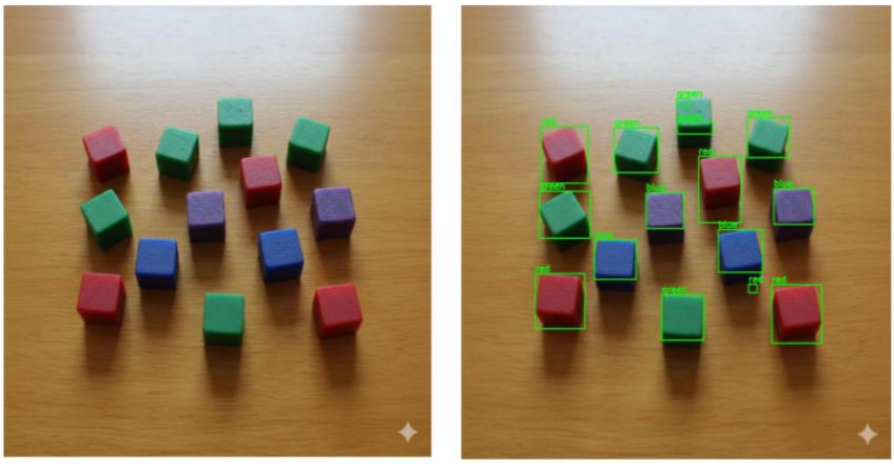


Рис. 1. Исходное и обработанное изображение в модуле компьютерного зрения

Модуль размещения и тестирования АКБ

Процесс укладки аккумуляторов в корпуса и последующее тестирование осуществляются с помощью манипулятора Dobot Magician. Аккумуляторы устанавливаются на блок “минус”, а робот с помощью щупа контактирует с “плюсом” каждого элемента. Алгоритм, реализованный в среде DobotStudio с использованием ручного обучения манипулятора, позволяет последовательно измерять напряжение и оценивать потерю мощности (Рис. 2). На основе полученных данных принимается решение о работоспособности каждого АКБ, что служит основой для дальнейшей сортировки.

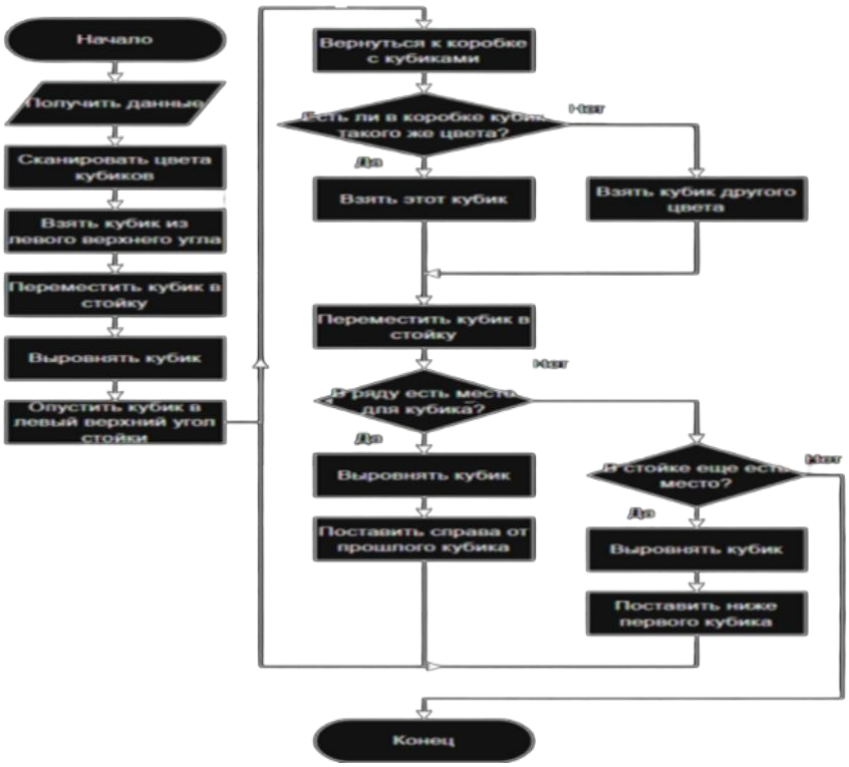


Рис. 2. Блок-схема алгоритма укладки и выравнивания макетов заготовок

Модуль сортировки по свободным ячейкам стеллажа

Модуль отвечает за сортировку изделий по свободным ячейкам в стеллаже тележки AVG. Процесс сортировки заключается в размещении изделий по свободным ячейкам стеллажа с помощью манипулятора, оснащенного механическим хватом. Определение свободных ячеек осуществляется за счет модуля камеры и манипулятора для дополнительной проверки ячейки. Алгоритм ведет учет заполнения ячеек и направляет манипулятор для точной укладки готовых изделий (Рис. 3).



Рис. 3. Тестовая сортировка работоспособности программы

Модуль транспортировки

Модуль ответственен за транспортировку изделий в тележке со стеллажами. Перемещение готовой продукции по заданным координатам осуществляется с помощью робота-транспортировщика TRIK. Для перевозки деталей была сконструирована платформа, на которую в зоне загрузки помещают некоторые объекты; далее робот транспортирует их в зону разгрузки. Для этого разработана программа краткого маршрута в среде TRIC Studio на языке Python. Дополнительно реализован механизм разгрузки путем наклона платформы (Рис. 4), что позволяет отказаться от участия манипулятора на финальном этапе.

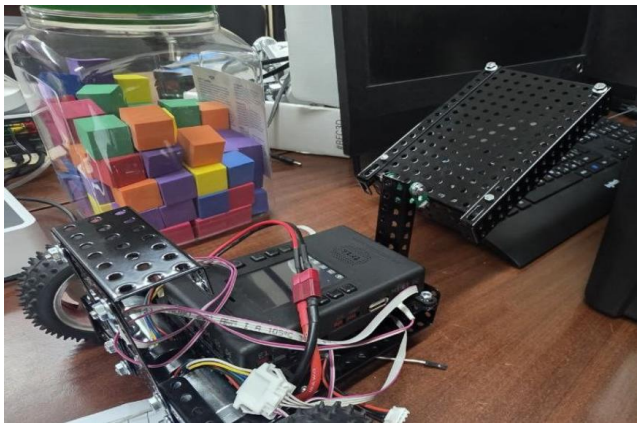


Рис. 4. Откидная платформа, закрепленная на роботе TRIK

В ходе выполнения проекта разработан роботизированный участок для тестирования и сортировки АКБ, включающий:

- модуль контроля качества с применением компьютерного зрения и индивидуально спроектированным креплением камеры;
- модуль автоматизированного тестирования электрических параметров аккумуляторов;
- модуль сортировки по свободным ячейкам стеллажа с динамическим учетом заполнения;
- модуль транспортировки готовой продукции с использованием робота TRIK.

Все модули интегрированы в единую технологическую цепочку, что позволяет снизить долю ручного труда, повысить производительность и качество обработки аккумуляторных батарей. Разработанные программы и конструктивные решения могут быть использованы на промышленных участках сборки компонентов электротранспорта.

Данный проект выполнялся в рамках проектной деятельности по созданию роботизированного участка для тестирования и сортировки АКБ на базе программного обеспечения Dobot Studio.

Список литературы

1. Программирование манипулятора в среде PYTHON: DOBOT. MAGICIAN: Образовательная инженерная платформа / О. А. Горнов. – М.: Издательство «Экзамен», 2021.
2. Учебно-методическое пособие для учителя: DOBOT MAGICIAN: Образовательная инженерная платформа. – Москва, 2021.
3. OpenCV документация https://docs.opencv.org/4.x/
4. Справочный центр TRIK https://help.trikset.com

Сабитов Р.А.
к.т.н., доцент кафедры «Динамика процессов и управления»
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
Мадаминов Х.О.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
madaminovkho@stud.kai.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ двух самых популярных типов датчиков расстояния в робототехнике: ультразвуковых и инфракрасных. Особое внимание уделено бюджетным датчикам, которые часто используются в учебных и сервисных проектах: ультразвуковому модулю HC-SR04 и инфракрасному датчику Sharp GP2Y0A21. На основе анализа научных публикаций и технической документации сравниваются основные характеристики двух типов датчиков. К таким характеристикам относятся диапазон измерения, точность, угол обзора, скорость отклика и зависимость от свойств поверхности препятствия. Обсуждаются типичные погрешности и факторы, которые влияют на работу датчиков. Также рассмотрены сценарии, в которых каждый тип датчика показывает себя лучше другого. Сделан вывод, что ультразвуковые датчики лучше подходят для измерения больших расстояний и работы с разными материалами поверхностей. Инфракрасные датчики удобнее использовать для коротких расстояний и быстрого реагирования на препятствия. Показано, что для бюджетных мобильных роботов оптимальным решением является сочетание двух типов датчиков. Это позволяет снизить общие погрешности и повысить надёжность автономной навигации.

Ключевые слова: ультразвуковой датчик, инфракрасный датчик, HC-SR04, Sharp GP2Y0A21, мобильный робот, измерение расстояния, точность, автономная навигация.

Sabitov R.A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Process Dynamics and Control
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
Madaminov H.O.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
madaminovkho@stud.kai.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACCURACY OF ULTRASONIC AND INFRARED DISTANCE SENSORS IN AUTONOMOUS NAVIGATION TASKS OF MOBILE ROBOTS

Abstract. This paper presents a comparative analysis of the two most popular types of distance sensors used in robotics: ultrasonic and infrared. Special attention is paid to low-cost sensors

that are often used in educational and service projects: the HC-SR04 ultrasonic module and the Sharp GP2Y0A21 infrared sensor. Based on the analysis of scientific publications and technical documentation, the main characteristics of the two sensor types are compared. These characteristics include the measurement range, accuracy, field of view, response time, and dependence on the properties of the obstacle surface. Typical measurement errors and factors that affect sensor performance are discussed. The scenarios in which each sensor type performs better than the other are also examined. It is concluded that ultrasonic sensors are better suited for measuring long distances and working with different surface materials. Infrared sensors are more convenient for short distances and fast obstacle response. It is shown that the optimal solution for low-cost mobile robots is a combination of the two sensor types. This approach reduces overall errors and improves the reliability of autonomous navigation.

Keywords: ultrasonic sensor, infrared sensor, HC-SR04, Sharp GP2Y0A21, mobile robot, distance measurement, accuracy, autonomous navigation.

Современная робототехника – одно из быстро развивающихся направлений науки и техники. Особое место в ней занимают мобильные роботы, которые могут двигаться в реальной среде без помощи человека. Такие роботы применяются в разных областях: в учебных проектах, в сервисных задачах, в логистике, на производстве и в быту. Для всех этих систем важно надёжно обнаруживать препятствия и измерять расстояние до них [3, 5].

Существует много типов датчиков расстояния. Самые точные – лазерные дальномеры (лидары) и системы технического зрения. Однако они дорогие и требуют большой вычислительной мощности. Для бюджетных учебных и исследовательских платформ обычно используют более простые датчики – ультразвуковые и инфракрасные. Они стоят недорого, легко подключаются к микроконтроллерам типа Arduino и обеспечивают приемлемую точность для большинства задач [1, 2, 10].

Ультразвуковой датчик HC-SR04 и инфракрасный датчик Sharp GP2Y0A21 являются самыми популярными решениями в этом сегменте. Однако каждый из них имеет свои особенности и ограничения. Ультразвуковой датчик плохо работает с поверхностями, которые поглощают звук. Инфракрасный датчик зависит от цвета и отражающих свойств объекта. На практике разработчики часто сталкиваются с вопросом: какой датчик выбрать для конкретной задачи? Этот вопрос особенно важен в условиях ограниченного бюджета и небольших размеров платформы [3, 7].

В научной литературе уже сделаны исследования по сравнению этих двух типов датчиков. Например, в работе Anitha A.A. и Adarsh S. [7] было проведено практическое сравнение датчиков на разных материалах. В работе Mustapha B. и соавторов [8] показано, что комбинация двух типов датчиков повышает точность системы. Однако большинство таких работ либо рассматривают узкий частный случай, либо не учитывают практические особенности бюджетных платформ на базе Arduino. Это создаёт необходимость в обзорной работе, которая собирает основные характеристики обоих датчиков и помогает разработчикам делать осознанный выбор.

Цель данной работы – провести сравнительный анализ точности ультразвуковых и инфракрасных датчиков расстояния в задачах автономной навигации мобильных роботов. Для достижения цели в работе решены следующие задачи: рассмотрены принципы работы обоих типов датчиков; сравнены их основные технические характеристики; проанализированы источники погрешностей; рассмотрены сценарии, в которых каждый тип датчика работает лучше; даны рекомендации по выбору датчика для бюджетной мобильной платформы.

Исследование проведено как сравнительный анализ на основе литературных источников и технической документации производителей. В качестве объектов сравнения выбраны два датчика: ультразвуковой модуль HC-SR04 и инфракрасный датчик Sharp GP2Y0A21. Эти модели выбраны потому, что они имеют похожую стоимость и широко используются в учебных и сервисных проектах [1, 2].

Ультразвуковой датчик HC-SR04 работает по принципу эхолокации. Он излучает короткий ультразвуковой сигнал на частоте 40 кГц и измеряет время до возврата сигнала от препятствия. Расстояние рассчитывается по формуле:

$$D = t \times c / 2, \quad (1)$$

где D – расстояние до объекта, t – время прохождения сигнала, c – скорость звука в воздухе (около 340 м/с при комнатной температуре). Заявленный диапазон работы датчика – от 2 до 400 см, погрешность – около ±3 мм [4, 10].

Инфракрасный датчик Sharp GP2Y0A21 работает по принципу триангуляции. Он излучает узкий пучок инфракрасного света через светодиод. Свет отражается от препятствия и попадает на линейку светочувствительных элементов внутри датчика. Положение точки на этой линейке зависит от расстояния до препятствия. На выходе датчик даёт аналоговое напряжение, которое связано с расстоянием нелинейной зависимостью. Поэтому для получения значения в сантиметрах нужно либо использовать таблицу преобразования, либо аппроксимировать характеристику линейной формулой по обратному значению напряжения [2]. Заявленный диапазон работы – от 10 до 80 см.

Для сравнения датчиков использовались следующие характеристики: диапазон измерения, точность измерения, угол обзора (диаграмма направленности), скорость отклика, чувствительность к материалу и форме поверхности, потребляемый ток и ориентировочная стоимость. Эти параметры являются ключевыми при выборе датчика для мобильного робота [3, 7].

Анализ проводился по следующему алгоритму. Сначала для каждого датчика были собраны технические характеристики из документации производителей и научных публикаций. Затем была построена сводная таблица сравнения. После этого рассмотрены типичные сценарии работы мобиль-

ного робота: движение в помещении, обход препятствий разной формы, работа на разных скоростях. Для каждого сценария оценено, какой датчик работает лучше и почему. В завершение даны общие рекомендации по выбору датчика.

Сравнение основных характеристик двух типов датчиков показало следующее. Ультразвуковой датчик HC-SR04 имеет диапазон измерения от 2 до 400 см. Это в 5 раз больше, чем у инфракрасного датчика Sharp GP2Y0A21 (10–80 см). Точность HC-SR04 – около ±3 мм, или приблизительно 1–2% от измеряемой величины. У инфракрасного датчика точность зависит от расстояния и условий освещения. На малых расстояниях (10–30 см) погрешность может составлять около 1%. На больших расстояниях (60–80 см) погрешность вырастает до 5–10% из-за нелинейной характеристики выходного сигнала [2, 7].

Угол обзора у датчиков существенно различается. У HC-SR04 этот угол составляет около 15°. Это значит, что датчик «видит» препятствие в широком конусе перед собой. Такое свойство удобно для общего обнаружения препятствий, но мешает точно определить положение объекта. У инфракрасного датчика Sharp GP2Y0A21 пучок узкий – менее 5°. Поэтому он точнее определяет положение объекта, но может «не заметить» препятствие, которое находится сбоку [2, 3].

Скорость отклика у инфракрасного датчика выше. Он обновляет данные примерно 25 раз в секунду (период около 40 мс). Ультразвуковой датчик работает медленнее: один цикл измерения занимает 20–30 мс, но для устойчивых результатов часто требуется усреднение по нескольким измерениям. Это увеличивает суммарное время до 50–100 мс [1, 4].

Особенно важно поведение датчиков при работе с разными материалами поверхности. В работе Anitha A.A. и Adarsh S. [7] был проведён прямой эксперимент. Авторы измеряли расстояние до препятствий из картона, бумаги, губки, дерева, пластика, резины и кафеля. Ультразвуковой датчик показал стабильные результаты на твёрдых ровных поверхностях (дерево, пластик, кафель). Однако его показания резко ухудшались при работе с губкой и тканью, которые поглощают звук. Инфракрасный датчик, наоборот, плохо работал с тёмными и блестящими поверхностями. Зеркало и чёрный пластик давали ему искажённые показания. Со светлыми матовыми поверхностями (бумага, дерево) он показал хорошую точность.

Похожие выводы получены в работе Mustapha B. и соавторов [8]. Авторы создали систему обнаружения препятствий, которая объединяет оба типа датчиков. После калибровки и линеаризации сигналов общая точность системы составила от 95 до 99%. Минимальный размер обнаруживаемого препятствия – 5×5 см. Этот результат показывает, что комбинация двух датчиков может частично компенсировать слабые стороны каждого из них.

Результаты также согласуются с данными русскоязычных авторов. Костишин М.О., Жаринов И.О. и Суслов В.Д. [5] показали, что для задач авто-

номной навигации в помещении единичного ультразвукового датчика на поворотной платформе достаточно для построения базовой системы обхода препятствий. При этом авторы отмечают необходимость дополнительной обработки данных для устранения шумов. Жмудь В.А. и соавторы [4] также подтверждают, что HC-SR04 при правильном применении обеспечивает приемлемую точность для большинства учебных задач, но не подходит для прецизионных измерений.

На основе анализа можно выделить сценарии, в которых каждый датчик работает лучше. Ультразвуковой датчик предпочтителен в следующих ситуациях: измерение больших расстояний (более 80 см); работа с препятствиями разных типов поверхности; работа в условиях изменяющегося освещения; необходимость обнаруживать объекты в широком секторе. Инфракрасный датчик лучше использовать в следующих случаях: точные измерения на коротких дистанциях (10–60 см); задачи быстрого реагирования на препятствие; работа с однородными светлыми поверхностями; применение в составе массива датчиков для определения формы объекта [2, 3, 7].

Также нужно отметить ограничения проведённого анализа. Во-первых, сравнение основано на литературных данных и характеристиках производителей. Реальные показания датчиков могут отличаться в зависимости от условий эксплуатации, температуры воздуха и качества питания. Во-вторых, в работе рассматривались только два конкретных бюджетных датчика. На рынке существует много других моделей с более широким диапазоном или повышенной точностью, например, ультразвуковой датчик HC-SR04P или инфракрасный VL53L0X. В-третьих, при практическом использовании датчиков важную роль играет программная обработка сигнала: фильтры, усреднение, калибровка. Эти аспекты выходят за рамки данной работы.

Таким образом, проведённый сравнительный анализ показывает, что выбор датчика расстояния для мобильного робота зависит от конкретной задачи. Ультразвуковой и инфракрасный датчики дополняют друг друга: один работает лучше там, где другой имеет слабые стороны. Для бюджетных автономных платформ оптимальным решением является комбинация двух типов датчиков. Такой подход уже применяется в ряде современных учебных и сервисных роботов и показывает высокую эффективность [8]. В перспективе можно рассмотреть интеграцию этих датчиков с алгоритмами машинного обучения для автоматической классификации типов препятствий и адаптивного выбора источника данных.

Список литературы

1. Baballe M.A., Bello M.I. Obstacle Avoidance Robot using an Ultrasonic Sensor with Arduino Uno // East African Scholars Journal of Engineering and Computer Sciences. – 2023. – Vol. 6, No. 6. – P. 78–86. – DOI: 10.36349/easjecs.2023.v06i06.001.

2. Benet G., Blanes F., Simó J.E., Pérez P. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots // Robotics and Autonomous Systems. – 2002. – Vol. 40, No. 4. – P. 255–266.

3. Cong Y., Du H. et al. A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots [Электронный ресурс] // PubMed Central. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10893033/ (дата обращения: 27.04.2026).

4. Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, No. 3. – DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032189.

5. Костишин М.О., Жаринов И.О., Суслов В.Д. Автономная навигация мобильного робота на основе ультразвукового датчика измерения расстояний [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnaya-navigatsiya-mobilnogo-robota-na-osnove-ultrazvukovogo-datchika-izmereniya-rasstoyaniy (дата обращения: 27.04.2026).

6. Hidayati Q. Obstacle Avoidance Mobile Robot With Ultrasonic Sensors // Jurnal Teknologi Terpadu. – 2017. – Vol. 5, No. 1. – P. 77–81.

7. Anitha A.A., Adarsh S. Performance comparison of Infrared and Ultrasonic sensors for obstacles of different materials in vehicle/robot navigation applications // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 149. – Art. 012141.

8. Mustapha B. et al. Ultrasonic and Infrared Sensors Performance in a Wireless Obstacle Detection System // 1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, IEEE. – 2013. – P. 487–492. – DOI: 10.1109/AIMS.2013.86.

9. Khaleel H.Z., Oleiwi B.K. Ultrasonic sensor decision-making algorithm for mobile robot motion in maze environment // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2024. – Vol. 13, No. 1. – P. 109–116. – DOI: 10.11591/eei.v13i1.6560.

10. Gabriel M.M., Kuria K.P. Arduino Uno, Ultrasonic Sensor HC-SR04 Motion Detector with Display of Distance in the LCD // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2020. – Vol. 9, No. 5. – P. 936–942.

Мел Сантос Камповерде
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
meansaca1@gmail.com
Лыу Чыонг Фук
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
luutruongphuc51@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ РОБОТИЗИРОВАННОГО УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ В ОТВЕРСТИЯХ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы технологического обеспечения операций роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей машин. Объектом исследований являются внутренние пересекающиеся отверстия, для которых характерны ограниченный доступ инструмента, нестабильная геометрия заусенцев и сложность обеспечения стабильного качества обработки. Проведён анализ основных методов удаления заусенцев и показаны ограничения ручной и механизированной обработки при ра-

боте с деталями сложной формы. Рассмотрены технологические возможности применения промышленных роботов, оснащённых инструментальным узлом и системой силовой обратной связи. Обоснована необходимость применения позиционно-силового управления для стабилизации контакта инструмента с обрабатываемой кромкой. Рассмотрены основные типы инструментов, применяемые для роботизированного удаления заусенцев: абразивные щётки, сферические твердосплавные фрезы и абразивные камни. Предложен общий подход к выбору инструмента и параметров обработки с учётом формы отверстий, материала детали, величины заусенца и требуемого качества поверхности.

Ключевые слова: роботизированная обработка; удаление заусенцев; пересекающиеся отверстия; позиционно-силовое управление; промышленный робот; отделочная обработка; контактное усилие.

Santos Campoverde Mel
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
meansaca1@gmail.com
Luu Truong Phuc
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
luutruongphuc51@mail.ru

TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR ROBOTIC DEBURRING OPERATIONS IN HOLES OF PARTS

Abstract. The paper considers technological support for robotic deburring operations in holes of machine parts. Special attention is paid to the processing of internal and intersecting holes, which are characterized by limited tool access, unstable burr geometry and difficulties in ensuring repeatable machining quality. The main methods of deburring are analyzed, and the limitations of manual and mechanized processing for complex-shaped parts are shown. The technological capabilities of industrial robots equipped with a tool unit and force feedback system are considered. The need for position-force control to stabilize the contact between the tool and the machined edge is substantiated. The main types of tools used for robotic deburring are considered: abrasive brushes, spherical carbide cutters and abrasive stones. A general approach to the selection of tools and machining parameters is proposed, taking into account the hole geometry, part material, burr size and required surface quality.

Keywords: robotic machining; deburring; intersecting holes; position-force control; industrial robot; finishing process; contact force.

В современном машиностроении большое значение имеет обеспечение качества деталей, имеющих внутренние пересекающиеся отверстия. После операций сверления, растачивания, фрезерования и других видов механической обработки на кромках отверстий часто образуются заусенцы. Их наличие может приводить снижению ресурса деталей и ухудшению эксплуатационных характеристик изделия.

Особенно сложной задачей является удаление заусенцев в пересекающихся отверстиях. В таких зонах доступ инструмента ограничен, а визуаль-

ный контроль затруднён. При этом форма, высота и расположение заусенцев могут существенно изменяться даже в пределах одной партии деталей. Это делает процесс отделочной обработки нестабильным и требует применения специальных технологических решений.

Традиционно удаление заусенцев выполняется вручную или с использованием простых механизированных инструментов. Однако ручная обработка имеет ряд существенных недостатков: высокая трудоёмкость, зависимость результата от квалификации рабочего, низкая повторяемость качества и сложность контроля величины снимаемого материала. При обработке отверстий малого диаметра, пересекающихся каналов и скрытых кромок эти недостатки проявляются особенно сильно.

Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение промышленных роботов для выполнения операций удаления заусенцев. Роботизированная обработка позволяет обеспечить повторяемость траектории движения инструмента, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить возможность автоматизации операций. Вместе с тем использование промышленных роботов при контактной механической обработке связано с рядом ограничений, среди которых можно выделить сравнительно низкую жёсткость робототехнической системы, погрешности позиционирования и сложность поддержания стабильного усилия контакта между инструментом и заготовкой.

В связи с этим актуальной является разработка технологического решения, обеспечивающего стабильное и качественное удаление заусенцев в отверстиях деталей на основе рационального выбора инструмента, режимов обработки, траектории движения и применения позиционно-силового управления.

Целью настоящей работы является обоснование принципов технологического обеспечения операций роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей с учётом ограниченного доступа инструмента и особенностей силового взаимодействия в зоне обработки.

Особенности удаления заусенцев в отверстиях деталей

Отверстия в деталях машин могут иметь различное назначение: монтажное, соединительное, направляющее, гидравлическое или технологическое. В корпусных деталях, гидроагрегатах, элементах авиационной и транспортной техники часто применяются пересекающихся отверстия и внутренние каналы. При обработке таких элементов заусенцы могут образовываться не только на наружных кромках, но и внутри детали, в зоне пересечения отверстий.

Удаление заусенцев в отверстиях осложняется следующими факторами:

- ограниченным доступом инструмента в зоне обработки;
- невозможностью визуального контроля при обработке;
- варьированием формы заусенца по длине кромки;

- необходимостью сохранения геометрии отверстия;
- риском образования вторичных заусенцев;
- необходимостью обеспечения стабильной величины притупления кромки.

Для таких условий недостаточно просто задать траекторию движения инструмента. В процессе обработки необходимо учитывать фактический съем металла. Если усилие контакта недостаточно, заусенец может быть удалён не полностью. Если усилие чрезмерно, возможно повреждение кромки, избыточный съём материала или ухудшение качества поверхности.

Таким образом, качество роботизированного удаления заусенцев определяется не только точностью позиционирования робота, но и стабильностью контактного взаимодействия в зоне обработки.

Анализ методов удаления заусенцев

В промышленности применяются различные методы удаления заусенцев: механические, термические, химические, электрохимические и абразивные. Выбор метода зависит от материала детали, размеров заусенцев, требований к качеству поверхности, серийности производства и доступности зоны обработки.

Ручное удаление заусенцев является наиболее простым и распространённым способом. Оно не требует сложного оборудования и может применяться для деталей различной формы. Однако данный метод отличается низкой производительностью и нестабильным качеством. Кроме того, при обработке внутренних отверстий ручной инструмент не всегда обеспечивает доступ к требуемой зоне.

Механизированные методы позволяют повысить производительность, однако их применение также ограничено при обработке сложных внутренних поверхностей. В случае пересекающихся отверстий инструмент должен не только достигать зоны контакта, но и сохранять правильную ориентацию относительно кромки. Это особенно сложно при наличии малых диаметров, уступов и скрытых поверхностей.

Специальные методы, такие как термическое или электрохимическое удаление заусенцев, могут быть эффективны для отдельных групп деталей, однако они требуют специального оборудования, подготовки процесса и не всегда обеспечивают локальное управляемое воздействие на конкретную кромку.

Промышленный робот обладает несколькими степенями свободы и способен ориентировать инструмент в пространстве, что особенно важно при обработке сложных деталей. При правильном управлении технологической операцией робот может обеспечить стабильную траекторию, повторяемость траекторий и качество обработки.

Инструменты для роботизированного удаления заусенцев

Для роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей могут применяться различные типы инструментов. Наиболее эффективными

для рассматриваемых условий являются абразивные щётки, сферические твердосплавные фрезы и абразивные камни.

Абразивные щётки обеспечивают мягкое воздействие на кромку и позволяют компенсировать небольшие погрешности позиционирования. Благодаря упругости рабочей части щётки контакт с поверхностью получается более стабильным, что снижает риск повреждения детали. Такой инструмент особенно целесообразен для финишного притупления кромок и удаления небольших заусенцев.

Сферические твердосплавные фрезы могут применяться в тех случаях, когда требуется более интенсивный съём материала или формирование заданной фаски. Их преимуществом является высокая режущая способность, однако при их использовании возрастает требование к точности траектории и контролю глубины обработки. При чрезмерном усилии или ошибке позиционирования возможен избыточный съём материала.

Абразивные камни применяются для финишной обработки и улучшения состояния поверхности. Они могут быть эффективны при обработке внутренних кромок, однако требуют правильного выбора формы, зернистости и режима контакта с деталью.

Выбор инструмента для роботизированного удаления заусенцев должен выполняться с учётом следующих факторов:

- диаметра отверстия;
- расположения кромки и доступности зоны обработки;
- материала детали;
- размеров и формы заусенца;
- требуемой величины притупления кромки;
- жёсткости системы «робот – инструмент – деталь»;
- допустимого уровня контактного усилия.

Силовое взаимодействие инструмента с деталью

Операция удаления заусенцев имеет контактный характер. Это означает, что результат обработки определяется не только скоростью вращения инструмента и траекторией его движения, но и величиной усилия между инструментом и деталью.

Сила резания при удалении заусенцев может быть представлена в общем виде:

$$F_c = k_c \cdot a \cdot b, \quad (1)$$

где F_c– сила резания; k_c– удельная сила резания материала; a– глубина снимаемого слоя; b– ширина контакта инструмента с заусенцем.

Данная зависимость показывает, что увеличение глубины обработки или ширины контакта приводит к росту силы резания. В реальных условиях параметры a и b не являются постоянными, так как форма заусенца может изменяться по всей длине обрабатываемой кромки.

Нормальная сила контакта может быть описана зависимостью:

$$F_n = k \cdot \Delta x, \quad (2)$$

где F_n– нормальная сила контакта; k– эквивалентная жёсткость технологической системы; Δx– деформация или отклонение в зоне контакта.

Для роботизированной обработки данная зависимость имеет большое значение, поскольку промышленный робот обладает меньшей жёсткостью по сравнению с классическим станком с ЧПУ. Даже небольшие ошибки позиционирования или отклонения формы детали могут приводить к изменению контактного усилия.

Сила трения между инструментом и поверхностью детали определяется выражением:

$$F_t = \mu \cdot F_n, \quad (3)$$

где F_t– сила трения; μ– коэффициент трения; F_n– нормальная сила контакта.

Следовательно, изменение нормального усилия влияет не только на процесс удаления материала, но и на трение, тепловыделение, износ инструмента и устойчивость обработки. Поэтому стабилизация контактного усилия является одним из ключевых условий технологического обеспечения качества роботизированного удаления заусенцев.

Применение позиционно-силового управления

При выполнении операций удаления заусенцев в отверстиях деталей робот должен одновременно решать две задачи: перемещать инструмент по программной траектории и поддерживать требуемое усилие контакта с обрабатываемой кромкой. Для этого целесообразно применять позиционно-силовое управление.

Позиционно-силовое управление представляет собой комбинированный способ управления движением рабочего органа, при котором по одному направлению обеспечивается перемещение по программной траектории, а по другим направлениям поддерживается заданное контактное усилие.

Для операций удаления заусенцев это особенно важно. Движение вдоль кромки отверстия должно быть достаточно точным, чтобы инструмент проходил по требуемой зоне. В то же время движение в направлении нормали к поверхности должно корректироваться по сигналу силовой обратной связи, чтобы не допустить чрезмерного или недостаточного прижатия инструмента.

В общем виде управляющее воздействие можно представить как:

$$u = K_p(x_0 - x) + K_f(F_0 - F_n), \quad (4)$$

где u– управляющее воздействие; x_0– заданное положение инструмента; x– текущее положение инструмента; F_0– заданное контактное усилие; F_n– фактическое нормальное усилие; K_p– коэффициент позиционного контура; K_f– коэффициент силового контура.

Смысл данного подхода заключается в том, что система управления стремится одновременно уменьшить ошибку положения и ошибку по усилию. При этом в реальном технологическом процессе необходимо рационально разделять направления управления: вдоль траектории применять позиционное управление, а в направлении контакта – силовое регулирование.

Применение позиционно-силового управления позволяет:

– компенсировать погрешности позиционирования робота;

– учитывать отклонения фактической геометрии детали;

– стабилизировать контакт инструмента с кромкой;

– снизить риск повреждения отверстия;

– повысить повторяемость качества обработки;

– уменьшить вероятность образования вторичных дефектов.

Устойчивость процесса и возможность возникновения колебаний

Одной из проблем роботизированной отделочной обработки является возможность возникновения колебаний в системе «робот – инструмент – деталь». Причинами таких колебаний могут быть переменная высота заусенца, изменение условий контакта, недостаточная жёсткость робота, неправильный выбор режимов обработки или чрезмерное усилие прижатия инструмента.

В первом приближении динамика технологической системы может быть описана уравнением:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \tag{5}$$

где m– приведённая масса системы; c– коэффициент демпфирования; k– приведённая жёсткость; x– смещение инструмента; $F(t)$– внешнее силовое воздействие со стороны процесса обработки.

Данное уравнение показывает, что устойчивость процесса зависит от соотношения инерционных, упругих и демпфирующих свойств системы. Если параметры обработки выбраны неправильно, колебания могут привести к неравномерному удалению заусенцев, ухудшению шероховатости поверхности, повреждению кромки и нестабильному качеству обработки.

Для снижения вероятности возникновения колебаний необходимо:

- выбирать инструмент с учётом жёсткости и доступности зоны обработки;

- ограничивать контактное усилие;

- применять плавные траектории движения;

- избегать резких изменений ориентации инструмента;

- использовать силовую обратную связь;

- проводить предварительное задание режимов обработки.

Таким образом, обеспечение устойчивости процесса является важной частью технологического обеспечения операций роботизированного удаления заусенцев.

Технологическое обеспечение операции

Технологическое обеспечение роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей должно включать не только выбор робота и инструмента, но и формирование всей структуры операции. В общем виде можно выделить следующие этапы:

a) анализ конструкции детали и определение зон образования заусенцев;

b) оценка доступности отверстий и внутренних кромок для инструмента;

c) выбор типа и геометрии инструмента с учётом материала детали и характера заусенца;

d) назначение предварительных режимов обработки: частоты вращения, подачи, глубины резания и контактного усилия;

e) формирование программной траектории движения инструмента;

f) настройка параметров управления;

g) проведение пробной обработки;

h) оценка качества удаления заусенцев и корректировка параметров.

Для деталей с пересекающимися отверстиями особое значение имеет ориентация инструмента относительно обрабатываемой кромки. При неправильной ориентации инструмент может не удалить заусенец полностью или, наоборот, «зарезать» деталь. Поэтому траектория должна формироваться с учётом геометрии пересечения каналов и допустимого угла контакта.

К основным параметрам, влияющим на качество операции, относятся:

- частота вращения шпинделя;
- подача инструмента;
- контактное усилие;
- величина удельного съема;
- тип и размер инструмента;
- направление движения;
- число проходов;
- жёсткость крепления детали;
- точность базирования заготовки.

Наиболее рациональным является такой подход, при котором параметры обработки подбираются экспериментально, начиная с минимальных значений контактного усилия и глубины съёма материала. Это позволяет снизить риск повреждения детали и определить устойчивый диапазон режимов обработки.

Планирование экспериментальных исследований

Для практической апробации предложенного подхода должна быть разработана методика экспериментальных исследований роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей. В качестве объекта исследования

на начальном этапе целесообразно использовать экспериментальные образцы с пересекающимися отверстиями, на кромках которых при механической обработке формируются заусенцы.

Экспериментальная установка будет включать промышленный робот, шпиндельный узел, инструмент для удаления заусенцев, силомоментный датчик и систему управления (рис.).

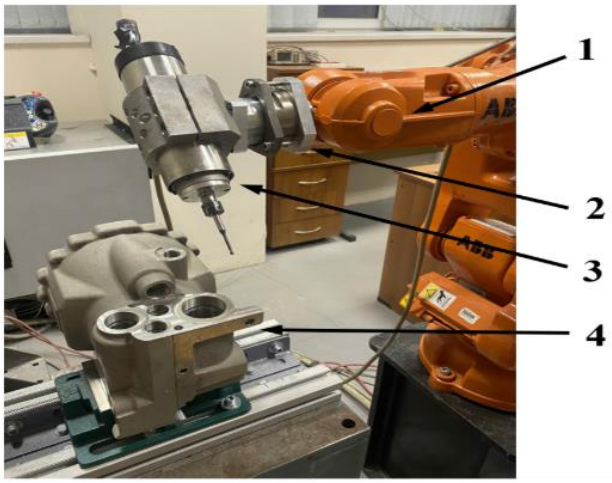


Рис. Экспериментальная установка для роботизированной обработки:
1 – робот ABB IRB 140T (контроллер IRC5); 2 – силомоментный датчик FTN- AXIA80 SI-200-8; 3 – шпиндель GDF65-24Z-0,8kW; 4 – корпус авиационного насоса

В рамках исследований предполагается сравнить несколько типов инструмента:

- абразивную щётку;
- сферическую твердосплавную фрезу;
- абразивный камень.

Для каждого инструмента необходимо определить диапазон технологических режимов, обеспечивающих стабильное удаление заусенцев без повреждения кромок отверстий. Основными варьируемыми параметрами могут быть частота вращения шпинделя, подача, контактное усилие и число проходов.

Оценку качества обработки предполагается проводить по следующим параметрам:

- качество удаления заусенцев;
- отсутствие вторичных заусенцев;
- равномерность притупления кромки;
- отсутствие повреждений стенки отверстия;
- стабильность контактного усилия;
- стабильность выполнения операции.

Такой подход позволит не только выбрать наиболее эффективный инструмент, но и определить рациональные режимы роботизированного удаления заусенцев для отверстий деталей сложной формы.

Анализ технологических особенностей показывает, что роботизированное удаление заусенцев в отверстиях деталей является сложной задачей, требующей учёта геометрических, силовых и динамических факторов. Основная трудность заключается в том, что заусенцы в отверстиях часто располагаются в труднодоступных зонах, где невозможно эффективно применять стандартные методы ручной или механизированной обработки.

Промышленный робот позволяет повысить гибкость процесса и обеспечить доступ инструмента к сложным поверхностям. Однако для получения стабильного качества недостаточно только задать траекторию движения. Необходимо контролировать контактное усилие, поскольку именно оно определяет характер взаимодействия инструмента с кромкой.

Наиболее перспективным является сочетание рационального выбора инструмента и применения позиционно-силового управления. Абразивные щётки могут использоваться для мягкого и стабильного удаления небольших заусенцев, сферические фрезы – для более интенсивной обработки, а абразивные камни – для финишного улучшения поверхности. При этом окончательный выбор инструмента должен подтверждаться экспериментально.

Предлагаемый подход может быть использован при разработке роботизированных технологических комплексов для обработки корпусных деталей, авиационных гидроагрегатов и других изделий, содержащих отверстия и внутренние каналы сложной формы.

В работе рассмотрены вопросы технологического обеспечения операций роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей. Показано, что данная операция является актуальной для современного машиностроения, особенно при обработке корпусных деталей, содержащих внутренние и пересекающиеся отверстия.

Установлено, что традиционные методы удаления заусенцев имеют ограниченную эффективность при обработке труднодоступных зон. Применение промышленных роботов позволяет повысить гибкость технологического процесса, однако требует учёта особенностей контактного взаимодействия инструмента с деталью.

Показано, что одним из ключевых условий стабильного качества является применение позиционно-силового управления, позволяющего одновременно обеспечивать следование инструмента по заданной траектории и поддерживать требуемое контактное усилие. Это особенно важно при обработке отверстий, где форма заусенца и условия контакта могут изменяться в процессе движения инструмента.

Рассмотрены основные типы инструментов для роботизированного удаления заусенцев: абразивные щётки, сферические твердосплавные фрезы и абразивные камни. Обосновано, что выбор инструмента должен выполняться с учётом геометрии отверстия, материала детали, размеров заусенца и требуемого качества обработанной поверхности.

В дальнейшем планируется проведение экспериментальных исследований, направленных на определение рациональных параметров роботизированного удаления заусенцев в отверстиях деталей и оценку эффективности различных типов инструмента при обработке труднодоступных кромок.

Список литературы

1. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей / А.П. Чапышев, А.В. Иванова, А.В. Крючкин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15. – № 6.
2. Дружинин С.А. Притупление острых кромок на металлических изделиях в приборостроении. / С.А. Дружинин, П.В. Петров – СГУГиТ, 2021.
3. Wei Ji. Industrial robotic machining: a review / Wei Ji, Lihui Wang // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019.
4. Development of a force-controlled robot for grinding, chamfering and polishing / Jinno M., Ozaki F., Yoshimi T. // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 1995.
5. Основы резания материалов и режущий инструмент: учебник для машиностроительных специальностей вузов. / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко– Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 560 с.
6. Физические эффекты в машиностроении: справочник. / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова [и др.] – М.: Машиностроение, 1993. – 224 с.
7. Технология машиностроения: учебник для вузов / под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2007. – 568 с.
8. Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке / М.В. Вартанов, А.И. Шварц, Д.Н. Миронов // «Наукоёмкие технологии в машиностроении». – 2025.

Котов А.К.
студент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
kotov_ak.2001@mail.ru
Лагута В.С.
к.т.н., доцент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, Москва
laguta@bmstu.ru

УПРАВЛЕНИЕ УЧЕБНОЙ ГПС «DENFORD» НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос организации управления производственной системой на основе цифрового двойника. Для отработки практических вопросов использована учебная ГПС «Denford» МГТУ им. Н.Э.Баумана. Проанализированы ограничения существующих подходов к управлению учебно-промышленным оборудованием. Рассмотрены особенности разработки цифрового двойника для производственной системы.

Предложена программная архитектура цифрового двойника на основе событийно-ориентированного подхода с поддержкой нескольких режимов работы. Описаны функциональные возможности разработанного программного обеспечения. Представлены результаты экспериментальной проверки системы. Сформулированы направления совершенствования методов управления с использованием цифровых двойников различного по составу и территориальному расположению оборудования производственных систем.

Ключевые слова: цифровой двойник, гибкая производственная система, промышленный робот-манипулятор, имитационное моделирование, управление оборудованием, управление производственной системой.

Kotov A.K.
Student
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
kotov_ak.2001@mail.ru
Laguta V.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Computer Systems for Production Automation
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
laguta@bmstu.ru

DIGITAL TWIN-BASED CONTROL OF A TRAINING FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEM “DENFORD”

Abstract. The article examines the organization of production system control based on the concept of a digital twin. To work through practical aspects, the educational flexible manufacturing system (FMS) "Denford" of Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) was used. The limitations of existing approaches to the control of educational and industrial equipment are analyzed. The features of developing a digital twin for a production system are discussed. A software architecture of the digital twin is proposed, based on an event-driven approach supporting multiple operating modes. The functional capabilities of the developed software are described, and the results of experimental verification of the system are presented. Directions for improving control methods using digital twins of production systems with different equipment compositions and geographical distributions are formulated.

Keywords: digital twin, flexible manufacturing system, industrial robot manipulator, simulation modeling, equipment control, production system control

Концепция Индустрии 4.0 предполагает глубокую интеграцию информационных технологий в производственные процессы, одним из ключевых инструментов которой является технология цифровых двойников [1, 2]. Под цифровым двойником понимается виртуальная модель физического объекта, процесса или системы, находящаяся в синхронизации с реальным прототипом за счёт обмена данными [3]. Применение цифровых двойников позволяет осуществлять мониторинг, диагностику, прогнозирование поведения и оптимизацию работы промышленного оборудования без риска повреждения реальных устройств.

Гибкие производственные системы (ГПС) представляют собой комплексные технологические объекты, объединяющие станки с числовым программным управлением (ЧПУ), транспортно-накопительные системы и промышленные роботы-манипуляторы. Управление такими системами требует координации множества единиц оборудования в процессе эксплуатации [4]. Учебная ГПС Denford (рис. 1), используемая в образовательном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана, является характерным примером подобной системы, однако её штатные средства управления обладают существенными ограничениями.



Рис. 1. Учебная гибкая производственная система Denford

Анализ проблем управления ГПС и постановка задачи

ГПС Denford состоит из следующих элементов: автоматизированный склад и транспортная лента (конвейер); модуль токарной обработки (токарный станок с ЧПУ и робот-манипулятор); модуль фрезерной обработки (фрезерный станок с ЧПУ и робот-манипулятор); система визуального контроля. Роботы-манипуляторы Mitsubishi MELFA RV-2AJ выполняют операции по перемещению заготовок и готовых деталей между конвейером и рабочей зоной станков. Штатное программное обеспечение MELSOFT RT ToolBox2 обеспечивающее управление учебной ГПС является устаревшим, не поддерживает современные механизмы сетевого взаимодействия и не позволяет реализовать дистанционное управление. Управление роботом осуществляется преимущественно в ручном режиме через пульт обучения, что требует постоянного присутствия оператора. Закрытый исходный код и проприетарные интерфейсы существенно ограничивают возможности расширения и модификации функционала. Отсутствует возможность автоматического функционирования системы в составе технологической цепочки.

Как отмечается в работах [2, 5], одной из ключевых проблем внедрения цифровых двойников является высокая сложность интеграции с существующими системами, имеющими устаревшее оборудование, не предусматривающее подключения современных средств сбора данных.

Простая замена системы управления на современную SCADA-платформу не решает задачу в полной мере. SCADA-системы ориентированы преимущественно на мониторинг и диспетчеризацию и не предназначены для реализации логики цифрового двойника, включающей моделирование кинематики робота, сценарное управление и поддержку нескольких режимов синхронизации с физическим оборудованием. Аналогично, платформы имитационного моделирования, такие как AnyLogic [6], обеспечивают мощные средства визуализации и анализа, однако не поддерживают работу в режиме реального времени и прямое взаимодействие с физическим оборудованием. Кроме того, коммерческие решения связаны с высокими лицензионными затратами, что критично для образовательных и исследовательских проектов. Программное обеспечение цифрового двойника ГПС Denford должно обеспечить:

- визуальную симуляцию работы всех компонентов системы;
- поддержку нескольких режимов работы (визуальная симуляция, эмуляция, управление физическим оборудованием);
- сценарное исполнение технологических последовательностей; графический интерфейс оператора;
- подключение к контроллеру робота по последовательному интерфейсу RS-232 [7].

Архитектура системы цифрового двойника построена по принципу событийно-ориентированной модульной архитектуры и состоит из нескольких слоёв (рис. 2):

- уровень пользовательского интерфейса,
- доменное ядро,
- подсистема маршрутизации оборудования,
- модуль интеграции с физическим роботом (bridge).

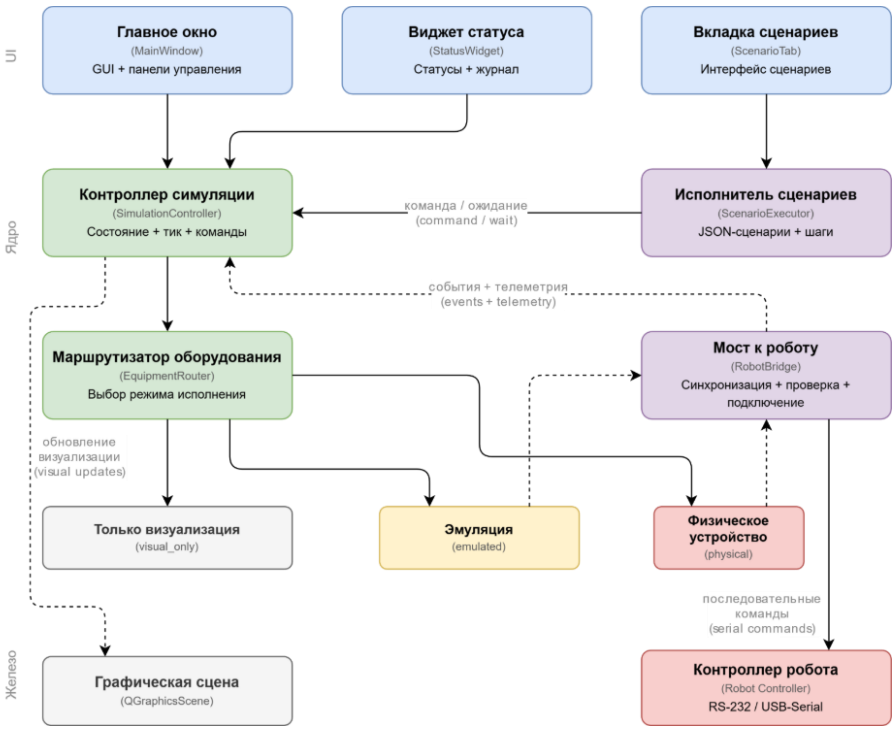


Рис. 2. Архитектура системы цифрового двойника

Уровень пользовательского интерфейса (MainWindow, StatusWidget, ScenarioTab) обеспечивает взаимодействие оператора с системой: ручное управление оборудованием, отображение статусов, запуск и мониторинг сценариев, журналирование событий. Интерфейс реализован на базе библиотеки PyQt5 [8]. Доменное ядро (SimulationController, models, math_utils) является центральным runtime-координатором системы. Оно хранит состояние всех объектов производственной ячейки (конвейер, паллеты, зоны остановки, роботы, станки, склад, штабелёр), выполняет тик-обновление физики и визуализации, обрабатывает команды от UI и сценарного движка. Кинематическая модель робота обеспечивает расчёт движения звеньев с учётом ускорения, торможения и коллизий.

Подсистема маршрутизации оборудования (EquipmentRouter) отделяет доменную команду от канала её исполнения. Один и тот же вызов может быть направлен по трём каналам: visual_only (только визуальная симуляция), emulated (bridge с эмулятором контроллера) или physical (bridge с реальным контроллером робота по RS-232). Такое разделение позволяет отлаживать сценарии без физического оборудования, а затем переключать систему на реальный робот без изменения прикладного кода.

Подключение к физическому роботу осуществляется через проводное последовательное соединение RS-232 или USB-Serial. Компьютер с установленным программным обеспечением цифрового двойника подключается непосредственно к контроллеру робота CR1-571 [8]. Для приёма и передачи данных используется библиотека pySerial [9]. Модульная структура программного обеспечения обеспечивает чёткое разделение ответственности между компонентами (рис. 3).

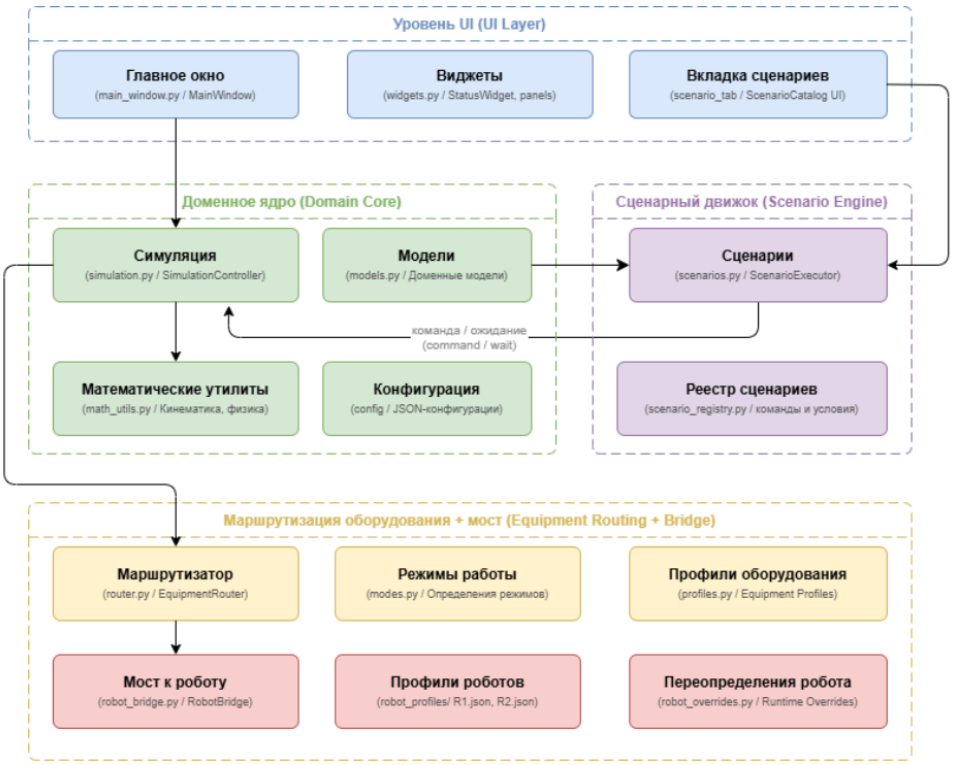


Рис. 3. Модульная структура программного обеспечения цифрового двойника

Функциональные возможности программного обеспечения. Разработанное программное обеспечение обеспечивает два основных режима работы: ручное управление и сценарное исполнение.

Ручной режим. Оператор может вручную управлять: запуском и остановкой симуляции; движением конвейера; загрузкой и выгрузкой деталей роботами по слотам паллет; открытием и закрытием дверей станков; запуском и остановкой обработки на станках; выбором ячейки склада и действиями штабелёра; состоянием зон остановки конвейера. Каждое действие отражается на визуальной модели в режиме реального времени.

Сценарный режим. Система поддерживает каталог JSON-сценариев, описывающих технологические последовательности. Каждый сценарий состоит из шагов трёх типов: command (выполнение команды), wait (ожидание условия) и operation (макрооперация, например полный цикл обработки на станке). Сценарный движок обеспечивает валидацию на этапе загрузки, механизмы таймаутов и повторных попыток, контроль прогресса и предзапускную проверку готовности оборудования.

Bridge-интеграция с роботом. Для команд робота (robot.load, robot.unload) реализован специализированный bridge-модуль (RobotEquipmentBridge), поддерживающий три режима синхронизации визуальной модели с контроллером робота:

- delay_confirmed – визуальная анимация начинается только после подтверждения завершения физической команды;

- predictive_with_verify – анимация запускается немедленно, при расхождении с фактическими данными выполняется откат к сохранённому состоянию;
- step_confirmed_pipeline – строгий режим, при котором каждый шаг визуальной анимации выполняется только после верификации соответствующего шага физического плана.

Для каждого робота определён профиль (R1.json, R2.json), содержащий координаты позиций (home, safe_retract, pallet_slot, machine_slot и др.), план отправки команд и параметры верификации. Bridge-модуль генерирует поток событий (started, step_send, tx/rx, step_verified, completed), которые отображаются в журнале и на панели статусов, обеспечивая полную наблюдаемость процесса.

Графический интерфейс оператора. Пользовательский интерфейс (рисунок 4) включает центральную панель визуализации производственной ячейки, на которой отображаются конвейер с паллетами, роботы-манипуляторы с анимацией захвата, станки с дверями и склад с ячейками. Панель управления содержит группы кнопок для каждого компонента системы. Панель статусов отображает текущее состояние оборудования и зон (GO/STOP). Вкладка сценариев позволяет выбирать и запускать технологические последовательности. Журнал событий обеспечивает диагностику работы системы.

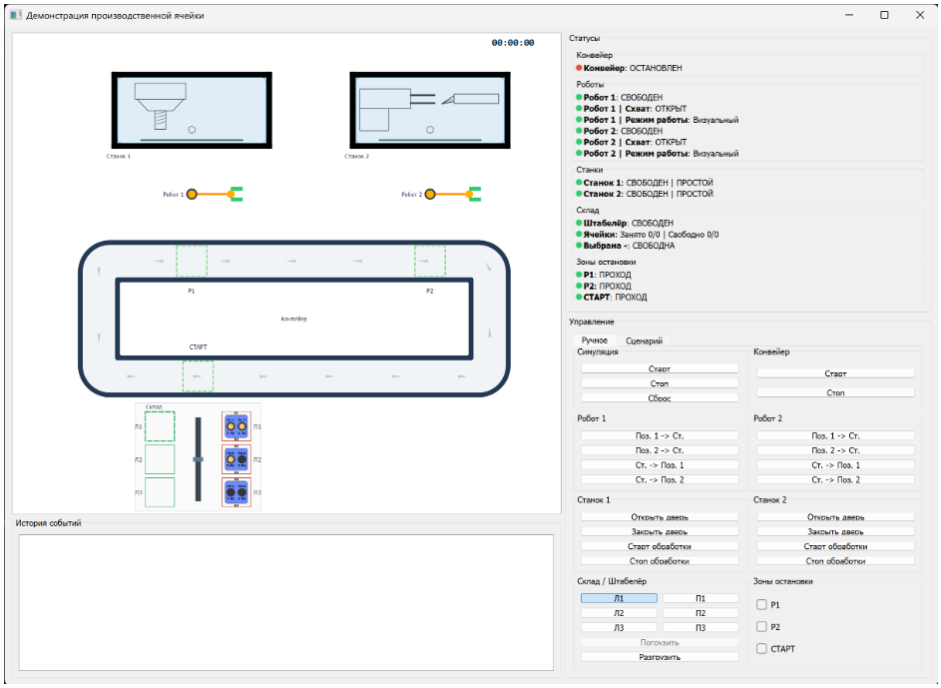


Рис. 4. Главный экран графического интерфейса оператора

Экспериментальная проверка. Для подтверждения работоспособности разработанной системы был проведён комплекс экспериментов, охватывающий все три режима работы оборудования.

Эксперимент 1: режим visual_only. Был запущен сценарий полного цикла обработки детали, включающий: выбор ячейки склада, подачу паллеты штабелёром на конвейер, перемещение паллеты к зоне робота, загрузку заготовки в станок роботом, имитацию обработки, выгрузку обработанной детали и возврат на конвейер. Система корректно выполнила все шаги сценария, визуализация соответствовала ожидаемому поведению. Проверена работа зон остановки конвейера, коллизии паллет и корректность управления дверями станков.

Эксперимент 2: режим emulated. Был активирован bridge-канал в режиме эмуляции для робота R1. Эмулятор контроллера обрабатывал команды в формате MELFA и возвращал подтверждения с имитацией задержек реального оборудования. Визуальная модель робота синхронизировалась с эмулятором в режиме step_confirmed_pipeline. Все шаги плана были верифицированы, события bridge отображались в журнале. Расхождений между командами и подтверждениями не обнаружено.

Эксперимент 3: режим physical. Система была подключена к физическому роботу Mitsubishi MELFA RV-2AJ через последовательный интерфейс RS-232. Были выполнены команды перемещения робота по заданным позициям из профиля (home, pallet_slot, machine_slot). Робот корректно отрабатывал все команды. Верификация положения звеньев после каждого шага подтвердила соответствие фактических координат ожидаемым в пределах заданной погрешности.

Результаты экспериментов подтвердили работоспособность системы во всех трёх режимах и продемонстрировали возможность бесшовного переключения между визуальной симуляцией, эмуляцией и управлением физическим оборудованием. Система успешно применима для задач отладки технологических сценариев, обучения операторов, проверки алгоритмов управления и мониторинга работы оборудования.

Апробация системы управления учебной ГПС «Denford» на базе цифрового двойника позволила определить направления дальнейшего развития: расширение набора сценариев и макроопераций; интеграция с облачным MQTT-брокером для обеспечения удалённого доступа и масштабируемости [10, 11]; внедрение микрокомпьютера Raspberry Pi [12] в качестве автономного вычислительного узла для круглосуточной связи с контроллером робота; добавление методов предиктивного обслуживания на основе анализа телеметрии; расширение системы для управления всеми компонентами ГПС (станками, складом, конвейером) через единый bridge-интерфейс.

Внедрение цифровых двойников в машиностроении является одним из перспективных направлений повышения эффективности производства. Особенно важно это для производств, ориентированных на выпуск продукции, связанной с повышенным технологическим риском в эксплуатации и/или безопасностью в человеко-машинных системах.

Список литературы

1. Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун. Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES // Вестник БГТУ. – 2018. – № 12. – С. 91–99.

2. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – № 5. – С. 105–113.

3. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021.

4. Овсянников М.В., Подкопаев С.А. Облачная система управления производством // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития. – 2020. – С. 338–342.

5. Дозорцев В.М., Венгер А.Л. Взаимодействие человека-оператора с искусственным интеллектом: проблема доверия // Организационная психология и психология труда. – 2022. – № 2. – С. 204–232.

6. AnyLogic. Библиотека моделирования процессов [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://anylogic.help/ru/library-reference-guides/process-modeling-library (дата обращения: 20.11.2025).

7. Яшкардин В. RS-232. Интерфейс между терминалом данных и передающим оборудованием линии связи // SoftElectro. – 2009. – URL: http://www.softelectro.ru/rs232.html (дата обращения: 01.10.2025).

8. Mitsubishi Industrial Robot CR1/CR2/CR3/CR4 Controller. Instruction Manual. Detailed Explanations of Functions and Operations. – Япония, 2007.

9. PyPi – pyserial 3.5 [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: https://pypi.org/project/pyserial/ (дата обращения: 01.12.2025).

10. MQTT – The Standard for IoT Messaging [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: https://mqtt.org/mqtt-specification/ (дата обращения: 10.11.2025).

11. Yandex IoT Core – Взаимосвязь ресурсов [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://cloud.yandex.ru/docs/iot-core/concepts/ (дата обращения: 01.12.2025).

12. Raspberry Pi Documentation [Электронный ресурс]. – URL: https://www.raspberrypi.com/ (дата обращения: 01.10.2025).

У Цюе
стажер
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Россия, Белгород
gg1253366@gmail.com
Рачков М.Ю.
д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и управление»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
michyur@gmail.com

ЦИФРОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕКОНФИГУРАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Аннотация. В статье рассматривается цифровое проектирование при моделировании и анализе конструкции реконфигурируемого гусенично-колесного робота. Разработана иерархическая структура сборки механизма реконфигурации, которая состоит из основания, поворотного рычага, шатуна, колесного рычага, линейного привода и крепежных элементов. Моделирование осуществлялось методом «сверху-вниз» с использованием базовых эскизов, задающих геометрию кинематической схемы. После формирования базовой геометрии проводится детализация каждого звена и кинематическая валидация модели. В среде САПР создан механизм с заданием типов соединений. При проектировании проведена корректировка геометрии деталей с учетом технологических ограничений изготовления. Для верификации собираемости выполнен анализ зазоров в узлах крепления. В ходе симуляции подтверждена корректность геометрии механизма. Отсутствуют интерференции между звеньями во всем диапазоне движения. Анализ сингулярных конфигураций в крайних положениях показал, что в колесном режиме звенья блока реконфигурации выстраиваются в одну линию, что обеспечивает надежность функционирования системы. На завершающем этапе цифрового проектирования сформирован комплект конструкторской документации. В нее входят 3D-модель сборки в формате STEP, комплект рабочих чертежей, а также спецификация материалов и покупных изделий.

Ключевые слова: мобильный робот, реконфигурация, цифровое проектирование, кинематическая валидация, верификации собираемости.

Wu Que
Intern
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Russia, Moscow
gg1253366@gmail.com
Rachkov M.Yu.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Control
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
michyur@gmail.com

DIGITAL DESIGN OF A MOBILE ROBOT RECONFIGURATION SYSTEM

Abstract. The article discusses digital design in modeling and analyzing a reconfigurable crawler-wheeled robot. The hierarchical structure of the reconfiguration mechanism assembly

has been developed, which consists of a base, a rotary lever, a connecting rod, a wheel lever, a linear actuator and fasteners. The modeling was carried out using the "top-down" method using basic sketches defining the geometry of the kinematic scheme. After forming the basic geometry, each link is detailed and the model is kinematically validated. A mechanism has been created in the CAD environment to specify connection types. During the design, the geometry of the parts was adjusted taking into account the technological limitations of manufacturing. To verify the assemblability, an analysis of the gaps in the attachment points was performed. During the simulation, the correctness of the geometry of the mechanism was confirmed. There is no interference between the links over the entire range of motion. The analysis of the singular configurations in the extreme positions showed that in the wheel mode, the links of the reconfiguration unit line up in one line, which ensures the reliability of the system. At the final stage of digital design, a set of design documentation has been formed. It includes a 3D model of the assembly in STEP format, a set of working drawings, as well as a specification of materials and purchased products.

Keywords: mobile robot, reconfiguration, digital design, kinematic validation, assembly verification.

В связи с ростом числа природных и техногенных чрезвычайных ситуаций стратегически значимой задачей становится обеспечение безопасности и эффективности проведения поисково-спасательных работ. В условиях разрушенной городской инфраструктуры, завалов, пожаров и радиационного загрязнения выполнение операций человеком сопряжено с недопустимым риском. В связи с этим возникает острая необходимость в применении мобильных роботов, способных выполнять инженерную разведку и доставку грузов в неструктурированных средах [1–6]. Решение данной проблемы находится в плоскости создания новых типов реконфигурируемых мобильных роботов, способных адаптировать геометрию шасси и кинематическую структуру под текущие условия рельефа местности [7–12]. Использование цифрового проектирования на базе компьютерных технологий и программного обеспечения для создания, моделирования и анализа проектов позволяет создавать точные и надежные модели, которые можно использовать для визуализациb, прототипирования и производства.

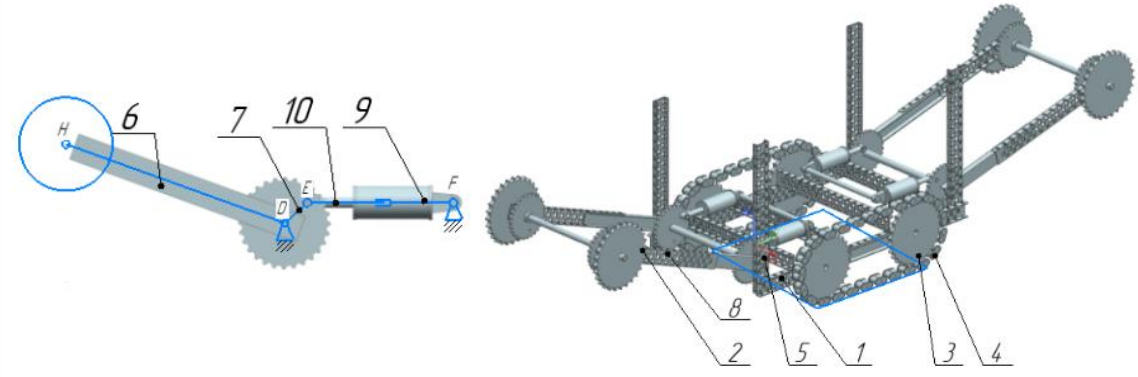
Конструкция рассматриваемого мобильного робота [12–15] содержит комбинированную систему движителей, состоящую из трансформируемых гусеничных и колесных групп (рис. 1).



Рис. 1. Схема мобильного робота:
1 – гусеничная группа, 2 – колесная группа, 3 – рычажная система, 4 – платформа, 5 – манипулятор (технологическое оборудование)

Робот имеет два гусеничных движителя, расположенных по бокам платформы, и два колесных движителя, установленных спереди и сзади платформы между гусеничными группами. Особенностью является то, что оси колесных движителей связаны с платформой посредством рычагов, привод которых размещен на платформе с возможностью перемещения колесных движителей по вертикали относительно платформы. Длина рычагов может варьироваться, что позволяет трансформировать робот для преодоления различных препятствий. Технологическое оборудование, например, манипулятор, располагается на платформе.

Перед изготовлением макета робота выполнено цифровое проектирование и валидация конструкции. Ключевыми элементами конструкции являются линейный электрический привод, поворотный рычаг, шатун и колесный рычаг (рис. 2).



а) *б)*

Рис. 2. Блок реконфигурации гусенично-колесного шасси:
а – общая 3D-модель в транспортном (гусеничном) положении;
б – модель в рабочем (колесном) положении

Система трансформации состоит из несущей платформы 1, жестко связанной с рамой робота. На платформе 1 шарнирно закреплена система рычагов трансформации 5, включающая поворотный рычаг 6, шатун 7 и колесный рычаг 8. На свободном конце колесного рычага 8 смонтирована колесная опора с колесом колесной группы 2. Гусеничная группа образована бортовыми колесами 3 и гусеничной лентой 4, охватывающей колесную опору в транспортном положении. Линейный электрический привод 9 шарнирно соединен с несущей платформой 1 и поворотным рычагом 6, образуя замкнутый кинематический контур.

В системе применен линейный электрический привод 9 с интегрированным датчиком положения штока и встроенным контроллером. Контроллер обеспечивает векторное управление двигателем постоянного тока, позволяя точно задавать положение штока с разрешением 0,1 мм. Для объединения приводов всех четырех блоков трансформации в единую систему ис-

пользуется центральный микроконтроллер, осуществляющий синхронизацию движения, компенсацию неровностей опорной поверхности и контроль токовых перегрузок.

Работа системы трансформации осуществляется следующим образом: в исходном (гусеничном) положении шток линейного привода 10 втянут, колесная опора с колесом 2 поднята выше уровня гусеничной ленты 4, робот опирается на гусеничную группу (колеса 3 и лента 4) и перемещается в режиме повышенной проходимости. При подаче команды на трансформацию происходит выдвижение штока привода 10, что вызывает поворот системы рычагов трансформации 5: поворотный рычаг 6 передает усилие через шатун 7 на колесный рычаг 8, опуская колесо колесной группы 2 ниже плоскости гусеничной ленты 4. Несущая платформа 1 вместе с грузом поднимается, гусеничная лента 4 отрывается от опорной поверхности, и робот переходит в энергоэффективный колесной режим движения. В крайнем нижнем положении звенья системы рычагов трансформации 5 выстраиваются в сингулярную конфигурацию (механизм «выпрямляется»), обеспечивая геометрическую блокировку без потребления энергии приводом – нагрузка полностью воспринимается жесткостью конструкции и механическими упорами.

Создание цифровой модели начинается с разработки иерархической структуры сборки. Механизм реконфигурации состоит из следующих компонентов: основание, поворотный рычаг, шатун, колесный рычаг, линейный привод (корпус и шток), крепежные элементы. Структура сборки представлена на рис. 3.

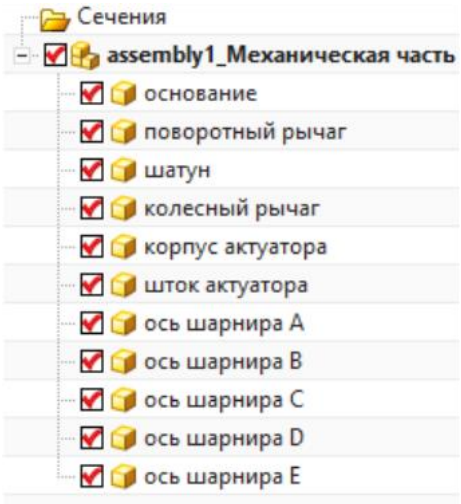


Рис. 3. Дерево сборки блока реконфигурации

Моделирование осуществлялось методом «сверху-вниз» (top-down) с использованием базовых эскизов, задающих геометрию кинематической схемы.

На первом этапе в среде САПР создается мастер-эскиз, содержащий точки шарниров и контурные линии звеньев согласно оптимальным длинам (рис. 4).

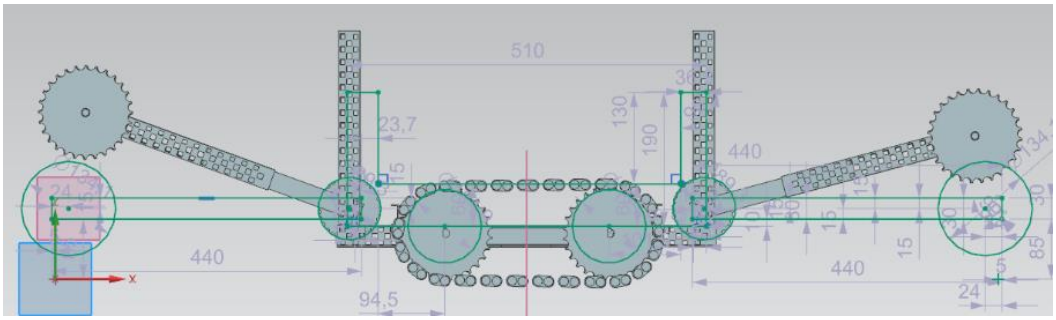
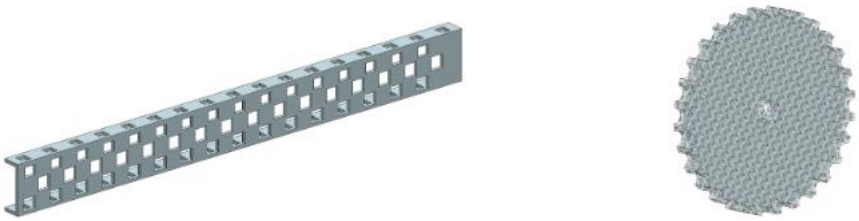


Рис. 4. Мастер-эскиз кинематической схемы в среде САПР

Данный подход обеспечивает параметрическую связь всех компонентов, и при изменении геометрии мастер-эскиза автоматически перестраиваются все зависимые детали. После формирования базовой геометрии проводится детализация каждого звена. Поворотный рычаг 2 и поворотное колесо 5 моделируются как тонкостенные конструкции с ребрами жесткости для снижения массы при сохранении требуемой прочности (рис. 5). Шатун 7 заменен на зубчатое колесо, движение которого может быть задано сервоприводом. Для моделирования линейного привода используется параметрическая модель, включающая корпус, шток, крепежные проушины и виртуальный привод для последующей кинематической симуляции.

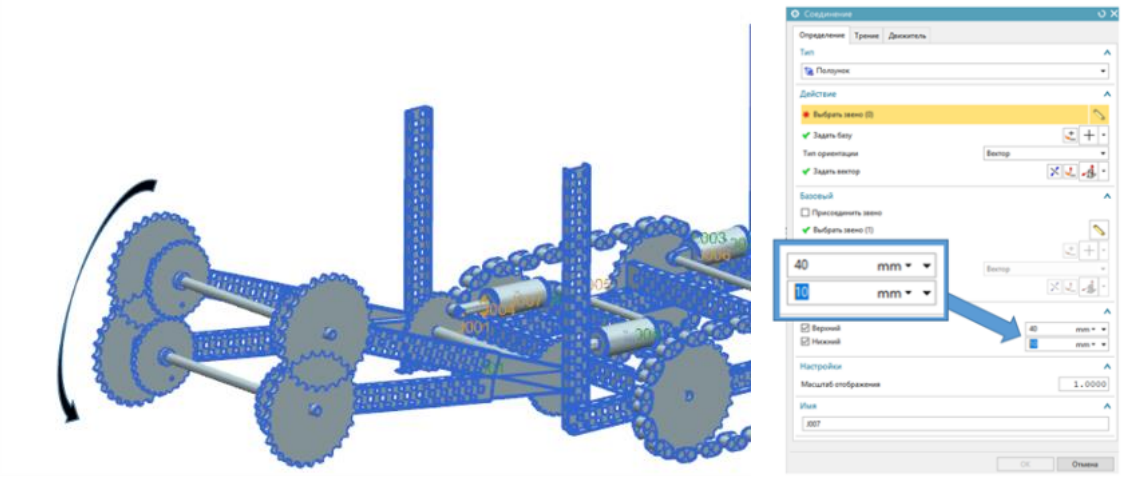


а) *б)*

Рис. 5. Структура деталей поворотного рычага с ребрами жесткости:
а – рычаг; б – поворотное колесо

Особое внимание уделено проектированию шарнирных соединений. Для снижения люфтов и износа применены подшипники скольжения из композитного материала с тефлоновым покрытием.

После завершения сборки цифровой модели проводится кинематическая валидация модели. В среде САПР создается механизм с заданием типов соединений (вращательные пары в точках и призматическая пара для штока актуатора). Управляемым звеном назначается шток привода. Путем задания диапазона перемещения штока от минимального до максимального значения выполняется анимация полного цикла реконфигурации (рис. 6).



а) *б)*

Рис. 6. Кинематическая симуляция полного цикла реконфигурации:
а – положения механизма при различных длинах штока привода;
б – меню кинематических ограничений

В ходе симуляции подтверждена корректность геометрии механизма. Отсутствуют интерференции между звеньями во всем диапазоне движения. Особое внимание уделено анализу сингулярных конфигураций в крайних положениях. Анализ показал, что в крайнем нижнем положении (колесный режим) звенья выстраиваются практически в одну линию с отклонением менее 2°.

На завершающем этапе цифрового проектирования сформирован комплект конструкторской документации: 3D-модель сборки в формате STEP (рис. 7), комплект рабочих чертежей, а также спецификация материалов и покупных изделий.

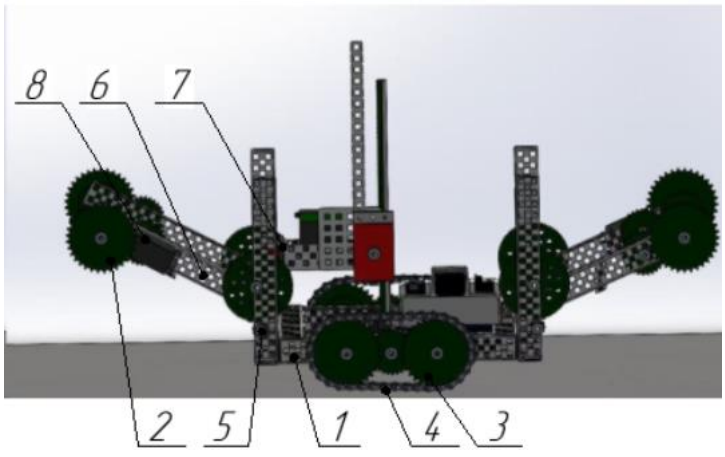


Рис. 7. Анализ зазоров в критических сечениях при крайних положениях механизма:
1 – несущая платформа; 2 – колесо колесной группы; 3 – колесо гусеничной группы;
4 – гусеничная лента; 5 – система рычагов трансформации; 6 – поворотный рычаг;
7 – шатун; 8 – колесный рычаг

При проектировании проведена корректировка геометрии деталей с учетом технологических ограничений изготовления. Для верификации собираемости выполнен анализ зазоров в узлах крепления. Минимальный зазор между подвижными элементами в любом положении механизма составляет 3 мм, что исключает возможность заклинивания при допусках изготовления ±0,5 мм.

Реализовано цифровое проектирование конструкции реконфигурируемого гусенично-колесного робота. Разработана иерархическая структура сборки механизма реконфигурации, которая состоит из основания, поворотного рычага, шатуна, колесного рычага, линейного привода и крепежных элементов. Осуществлено моделирование конструкции методом «сверху-вниз» с использованием базовых эскизов, задающих геометрию кинематической схемы. Сформирована базовая геометрия и детализация каждого звена. Проведена кинематическая валидация модели. В среде САПР создан механизм с заданием типов соединений и скорректирована геометрия деталей с учетом технологических ограничений изготовления. Для верификации собираемости выполнен анализ зазоров в узлах крепления. В ходе симуляции подтверждена корректность геометрии механизма и отсутствие интерференции между звеньями во всем диапазоне движения. Анализ сингулярных конфигураций в крайних положениях показал, что в колесном режиме звенья блока реконфигурации выстраиваются в одну линию, что обеспечивает надежность функционирования системы. На завершающем этапе цифрового проектирования сформирован комплект конструкторской документации. В нее входят 3D-модель сборки в формате STEP, комплект рабочих чертежей, а также спецификация материалов и покупных изделий.

Список литературы

1. Cosenza C., Niola V., Pagano S., Savino S. Theoretical study on a modified rocker-bogie suspension for robotic rovers // Robotica. – 2023. – Vol. 41, No. 10. – P. 2915–2940.
2. Gao X., Guan X., Yang Y., Zhang J. Design and ground performance evaluation of a multi-joint wheel-track composite mobile robot for enhanced terrain adaptability // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 12. – Art. 7270.
3. Huang Y., Shi X., Zhou Y., Xiong Z. Autonomous navigation of mobile robot in radiation environment with uneven terrain // International Journal of Intelligent Robotics and Applications. – 2023. – Vol. 7. – P. 497–509.
4. Li H., Xie Z., Cao Y., Zhang R., Qin J. Design and analysis of a mobile robot with transformable wheel-legged mechanism // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2025. – Vol. 17, No. 6. – Art. 061015.
5. Luo Z., Shang J., Wei G., Ren L. Reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage // Mechanism and Machine Theory. – 2018. – Vol. 128. – P. 16–32.
6. Park I., Yoon H., Kim S., et al. Review on Transformable Wheel: Mechanism Classification and Analysis According to Mechanical Complexity // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2025. – Vol. 26. – P. 737–755.

7. Reconfigurable wheel-track for all-terrain mobility: pat. WO2020223295 A1 (PCT), IPC B62D55/04; applicant/assignee: Carnegie Mellon University; international application PCT/US2020/030392. – Publ. 05.11.2020.

8. Rollins E., Luntz J., Shamah B., Whittaker W. NOMAD: a demonstration of the transforming chassis // IFAC Proceedings Volumes. – 1998. – Vol. 31, No. 2. – P. 211–216.

9. Tang Y., Xu X., Zhang L., et al. Structure Design and Configuration Optimization of the Reconfigurable Deformed Tracked Wheel based on Terramechanics Characteristics // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2023. – Vol. 108. – Art. 7.

10. Wang J., Liu C., Wei W., Yan Q. Review on the reconfigurable wheel-tracked system // Proceedings of the 11th Asia-Pacific Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS 2022). – 2022. – Paper 0861.

11. Zhang Minglu, Li Min, Tian Ying, et al. Design and parameter analysis of wheel-track composite passive adaptive robot // Mechanical Science and Technology. – 2019. – Vol. 38, No. 2. – P. 198–204.

12. Rachkov M., Emelyanov A., Kolot V. Reconfigurable autonomous wheel-tracked robot // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): Proceedings. – 2019. – P. 1–5.

13. У Ц., Рачков М. Ю. Расчет и оптимизация работы механизма реконфигурации колесно-гусеничного мобильного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 4. – С. 209–215.

14. У Ц., Рачков М. Ю., Архипов М. В. Система управления преодолением препятствий для трансформируемого робота на основе PID-регулирования // СМиС-2025. Технологии управления качеством = SMaC 2025: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 21–24 мая 2025 г.) / сост. А. П. Адылина, Д. А. Клочкова. – Москва: Московский Политех, 2025. – С. 452–456.

15. У Ц., Рачков М. Ю., Адылина А. П. Автономный технологический мобильный робот // СМиС-2024. Технологии управления качеством = SMaC 2024: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Москва: Московский Политех, 2024. – С. 373–379.

Хайруллин А.А.
аспирант
ФГУП «НАМИ»
Россия, Москва
a.khayrullin@nami.ru
Коломейченко А.В.
д.т.н., главный специалист управления перспективных технологий
Центра сельскохозяйственного машиностроения,
ФГУП «НАМИ»
a.kolomiychenko@nami.ru

К ВОПРОСУ ТРАНСМИССИИ РОБОТИЗИРОВАННОГО БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы обоснования выбора типа трансмиссии для роботизированного беспилотного транспортно-технологического средства (РБТТС), предназначенного для работы в агропромышленном комплексе. Проведён анализ современных тенденций развития роботизированной сельскохозяйственной техники, определены основные эксплуатационные требования к трансмиссиям беспилотных платформ.

Выполнен сравнительный анализ механических, гидромеханических, гидростатических и электромеханических трансмиссий по таким критериям, как коэффициент полезного действия, степень автоматизации, плавность хода, надёжность и стоимость. Представлены преимущества и недостатки каждого типа трансмиссии. Описаны принцип работы, компонентная база и функциональные особенности электромеханической трансмиссии, включая индивидуальный привод гусеничных движителей, частотное регулирование, рекуперацию энергии и интеграцию с системами искусственного интеллекта. Обосновано, что электромеханическая трансмиссия является наиболее перспективным решением для создания высокоавтоматизированных, энергоэффективных и адаптивных роботизированных транспортно-технологических средств сельскохозяйственного назначения. Показано, что применение дизель-генераторной установки, буферного накопителя энергии и интеллектуальных алгоритмов управления позволяет обеспечить высокие эксплуатационные характеристики и полную автономность функционирования.

Ключевые слова: электромеханическая трансмиссия, роботизированное транспортно-технологическое средство, беспилотное управление, агропромышленный комплекс, сравнительный анализ трансмиссий.

Khayrullin A.A.
Postgraduate Student
FSUE «NAMI»
Russia, Moscow
a.khayrullin@nami.ru
Kolomeichenko A.V.
Doctor of technical sciences, chief specialist of department of advanced technologies at the Centre for agricultural engineering,
FSUE «NAMI»
Russia, Moscow
a.kolomiychenko@nami.ru

ON THE ISSUE OF TRANSMISSION OF A ROBOTIC UNMANNED TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLE FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Annotation. The article discusses the issues of substantiating the choice of transmission type for a robotic unmanned transport and technological vehicle (RUTTV) designed to operate in the agro-industrial complex. The analysis of modern trends in the development of robotic agricultural machinery is carried out, the main operational requirements for transmissions of unmanned platforms are determined. A comparative analysis of mechanical, hydromechanical, hydrostatic and electromechanical transmissions has been performed according to criteria such as efficiency, degree of automation, smoothness, reliability and cost. The advantages and disadvantages of each type of transmission are presented. The principle of operation, component base, and functional features of an electromechanical transmission are described, including individual caterpillar drive, frequency control, energy recovery, and integration with artificial intelligence systems. It is proved that an electromechanical transmission is the most promising solution for creating highly automated, energy-efficient and adaptive robotic transport and technological means for agricultural purposes. It is shown that the use of a diesel generator set, a buffer energy storage device and intelligent control algorithms allows for high performance and complete autonomy of operation.

Keywords: electromechanical transmission, robotic transport and technological vehicle, unmanned control, agro-industrial complex, comparative analysis of transmissions.

Современное развитие агропромышленного комплекса (АПК) характеризуется активным внедрением автоматизированных и роботизированных систем, направленных на повышение производительности труда, снижение эксплуатационных затрат и минимизацию влияния человеческого фактора. Одним из наиболее перспективных направлений является создание роботизированных беспилотных транспортно-технологических средств (РБТТС), способных выполнять широкий спектр сельскохозяйственных операций: посев, обработку почвы, внесение удобрений, транспортировку грузов и мониторинг состояния посевов.

По данным исследований Strategy Partners о рынке агротехнологий, в настоящее время в Российской Федерации используется около 15000 сельскохозяйственной техники с системами автоматического управления и навигации.

Ключевым элементом конструкции любого транспортного средства является трансмиссия, обеспечивающая передачу мощности от двигателя к ведущим колесам или рабочим органам. От правильного выбора типа трансмиссии зависят энергетическая эффективность машины, её проходимость, надежность, управляемость и адаптивность к различным условиям эксплуатации. Для беспилотных роботизированных систем требования к трансмиссии значительно возрастают, поскольку она должна обеспечивать высокую точность управления, возможность автоматического регулирования режимов движения и интеграцию с интеллектуальными системами управления.

В связи с этим задача обоснования выбора типа трансмиссии для роботизированного беспилотного транспортно-технологического средства является актуальной и имеет важное научно-практическое значение.

Требования к трансмиссии роботизированного транспортного-технологического средства для агропромышленного комплекса

Эксплуатация беспилотной техники в условиях сельского хозяйства предъявляет к трансмиссии ряд специфических требований:

1. Высокая плавность движения: при выполнении агротехнологических операций необходимо поддерживать стабильную скорость движения с минимальными колебаниями.

2. Возможность автоматизированного управления: трансмиссия должна эффективно взаимодействовать с электронными системами управления и навигации.

3. Высокий крутящий момент на малых скоростях: для движения по рыхлым и влажным грунтам требуется значительная тяговая сила.

4. Энергоэффективность: снижение расхода топлива и уменьшение потерь мощности особенно важно при длительной автономной работе.

5. Надежность и простота обслуживания: работа в тяжелых условиях АПК требует высокой устойчивости к загрязнениям, пыли и перепадам температур.

6. Маневренность и адаптивность: возможность быстрого изменения режимов движения и реализации интеллектуальных алгоритмов управления.

В сельскохозяйственном машиностроении применяются четыре основных типов трансмиссий, преимущество и недостатки которых описаны в таблице 1. Сравнительный анализ типов трансмиссий представлен в таблице 2.

Таблица 1

Преимущества и недостатки типов трансмиссий

Тип трансмиссии	Преимущества	Недостатки
Механическая	- высокий коэффициент полезного действия; - сравнительно простая конструкция; - низкая стоимость изготовления и ремонта; - высокая надежность.	- сложность автоматизации управления; - наличие ударных нагрузок при переключении передач; - ограниченная плавность изменения скорости; - повышенные требования к системе управления беспилотного комплекса.
Гидромеханическая	- плавное изменение крутящего момента; - хорошая проходимость; - снижение динамических нагрузок; - возможность автоматизации.	- повышенные энергетические потери; - сложность конструкции; - высокая стоимость; - необходимость качественного обслуживания гидросистемы.
Гидростатическая	- бесступенчатое регулирование скорости; - высокая плавность хода; - простота автоматизации; - возможность независимого управления колесами; - высокая маневренность.	- сравнительно низкий КПД; - нагрев рабочей жидкости; - чувствительность к загрязнению масла; - высокая стоимость гидравлических компонентов.
Электромеханическая	- высокая точность управления; - возможность индивидуального привода колес; - простота интеграции с цифровыми системами; - высокий уровень автоматизации; - снижение механических потерь; - возможность рекуперации энергии.	- высокая стоимость аккумуляторов и силовой электроники; - ограниченная автономность; - необходимость развитой системы охлаждения; - зависимость от емкости источников энергии.

Таблица 2

Сравнительный анализ типов трансмиссий

Тип трансмиссии	КПД	Автоматизация	Плавность хода	Надежность	Стоимость	Сочетание с РБТТС
Механическая	Высокий	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая	Ограниченно
Гидромеханическая	Средний	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая	Частично
Гидростатическая	Средний	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая	Хорошо
Электромеханическая	Высокий	Очень высокая	Очень высокая	Высокая	Высокая	Предпочтительно

Механическая трансмиссия является наиболее распространённым типом передачи мощности в сельскохозяйственной технике. Она включает коробку передач, сцепление, карданные передачи и дифференциалы. Для роботизированных платформ механическая трансмиссия менее предпочтительна вследствие сложности реализации полностью автоматического режима работы.

Гидромеханическая трансмиссия сочетает механическую передачу с гидротрансформатором. Данный тип трансмиссии широко применяется в тяжелой технике, однако для компактных роботизированных платформ может быть избыточно сложным.

Гидростатическая трансмиссия использует гидронасосы и гидромоторы для передачи энергии. Гидростатическая трансмиссия хорошо подходит для беспилотных платформ, особенно при необходимости точного позиционирования и маневрирования.

Электромеханическая трансмиссия (ЭМТ) основана на использовании электрогенератора, аккумуляторной батареи и тяговых электродвигателей. Электромеханическая трансмиссия является наиболее перспективным вариантом для современных роботизированных беспилотных систем благодаря высокой степени управляемости и совместимости с интеллектуальными алгоритмами.

Как видно из таблицы 2, для РБТТС агропромышленного комплекса наиболее рациональным решением является применение электромеханической трансмиссии.

Принцип работы электромеханической трансмиссии

Дизельный двигатель приводит во вращение электрогенератор, преобразующий механическую энергию в электрическую. Далее электрическая энергия поступает через силовые преобразователи к тяговым электрическим машинам, установленным на каждом борту гусеничного движителя.

Электромеханическая трансмиссия роботизированного беспилотного транспортно-технологического средства включает следующие основные компоненты:

1. Дизель-генераторную силовую установку;
2. Тяговые электрические машины для индивидуального силового электропривода каждого гусеничного движителя;
3. Силовые преобразователи;
4. Буферный накопитель электрической энергии;
5. Валы отбора мощности с электрическим приводом;
6. Систему интеллектуального управления;
7. Систему рекуперации энергии.

Применение индивидуального электропривода позволяет независимо регулировать скорость вращения каждого движителя, что обеспечивает:

- повышение маневренности;
- уменьшение радиуса поворота;

– улучшение устойчивости движения;
– повышение точности навигации.

Буферный накопитель электрической энергии выполняет функции:

– сглаживания пиковых нагрузок;
– накопления энергии рекуперации;
– обеспечения кратковременного автономного питания;
– стабилизации режимов работы силовой установки.

Валы отбора мощности (ВОМ) с электрическим приводом обеспечивают подключение технологического оборудования:

– сеялок;
– опрыскивателей;
– культиваторов;
– уборочных механизмов.

Это позволяет реализовать полностью электрическую архитектуру роботизированной машины.

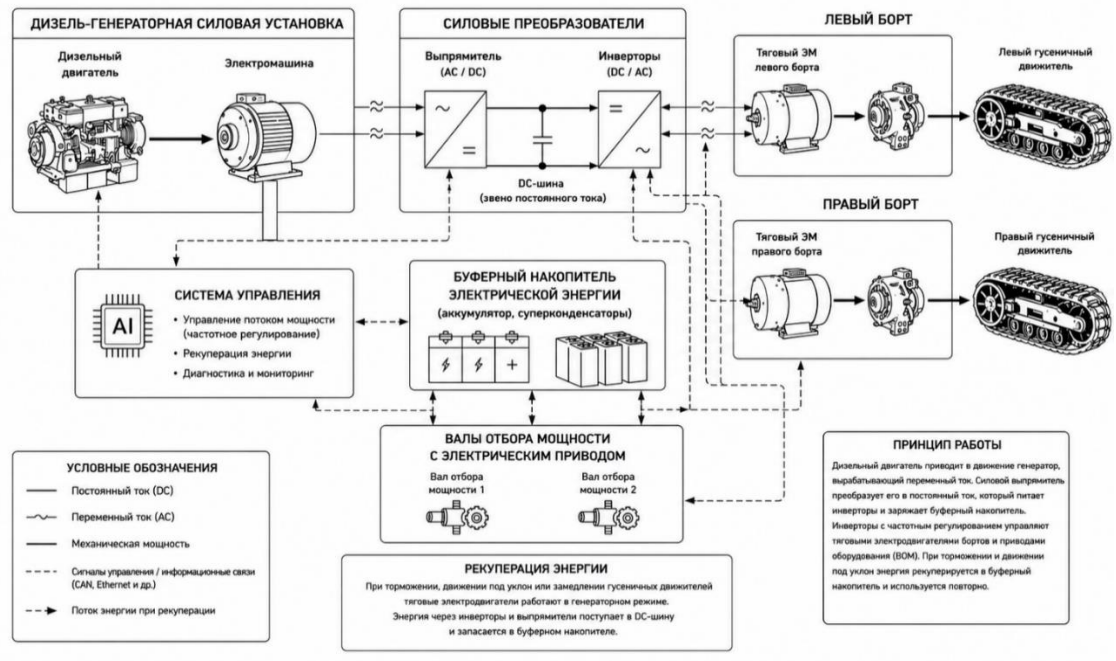


Рис. Структурная схема ЭМТ РБТТС

В компоновочно-конструкционных схемах современных роботизированных машин применяется ряд инновационных технических решений.

Управление потоком мощности осуществляется посредством частотного регулирования бортовыми электродвигателями. Использование преобразователей частоты позволяет:

– плавно изменять скорость движения;
– регулировать крутящий момент;
– уменьшать пусковые нагрузки;
– обеспечивать точность управления;

– повышать энергетическую эффективность.

Частотное управление обеспечивает оптимальный режим работы каждого движителя в зависимости от:

– типа грунта;
– рельефа местности;
– массы груза;
– тягового сопротивления.

Одним из важнейших преимуществ электромеханической трансмиссии является возможность рекуперации энергии. При торможении или движении по инерции тяговые электродвигатели переходят в генераторный режим, преобразуя кинетическую энергию машины в электрическую. Полученная энергия накапливается в буферном накопителе, что позволяет:

– снизить расход топлива;
– уменьшить тепловые потери;
– увеличить ресурс тормозной системы;
– повысить общую энергоэффективность машины.

Также для обеспечения беспилотного режима работы РБТТС используются алгоритмы и программные средства с элементами искусственного интеллекта. Электромеханическая трансмиссия обеспечивает точное управление движителями и равномерное распределение тягового усилия.

Основными преимуществами электромеханической трансмиссии являются: высокий уровень автоматизации, возможность полной роботизации, высокая точность управления, плавность движения, энергоэффективность, возможность рекуперации энергии, повышение маневренности, снижение механических потерь и интеграция с системами искусственного интеллекта.

Кроме того, электромеханическая трансмиссия обеспечивает перспективы дальнейшего развития: гибридных силовых установок, автономных сельскохозяйственных комплексов, интеллектуальных систем управления и цифрового земледелия.

Проведённый анализ показывает, что электромеханическая трансмиссия является наиболее перспективным вариантом для роботизированных беспилотных транспортно-технологических средств агропромышленного комплекса.

Использование дизель-генераторной силовой установки, индивидуальных тяговых электрических машин, силовых преобразователей и буферных накопителей энергии обеспечивает высокую эффективность, плавность движения и возможность полной автоматизации управления.

Применение частотного регулирования, рекуперации энергии и интеллектуальных алгоритмов управления с элементами искусственного интеллекта позволяет существенно повысить энергетическую эффективность, проходимость и эксплуатационные характеристики машины.

Таким образом, электромеханическая трансмиссия обеспечивает необходимые условия для создания высокоэффективных роботизированных

сельскохозяйственных машин нового поколения, способных функционировать в автономном беспилотном режиме в условиях современного агропромышленного комплекса.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-11-2025-058.

Список литературы

1. Шарипов В. М., Эглит И. М., Парфенов А. П., Щетинин Ю. С./ Трансмиссии тракторов (конструкция) / В. М. Шарипов. – М.: МГТУ «МАМИ», 1999. – 245 с.
2. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Алексеев И.С., Ильченко Е.Н. /Обоснование выбора параметров электромеханической трансмиссии для трактора тягового класса 0,6–0,9 и согласование тяговых характеристик // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 63–70.
3. Липанова Л. / Сектор АПК внедрил 15000 беспилотных комбайнов и тракторов / Текст: электронный [сайт].- 2026. URL: https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2026/05/18/1197859-sektor-apk-vnedril-15-000-bespilotnih-kombainov-i-traktorov?from=copy_text (дата обращения:18.05.2026).

Хитров В.А.
аспирант
Тихоокеанский государственный университет
Россия, Хабаровск
Khitrov-2306@yandex.ru

МЕТОДЫ ЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ КОЛЕС НАСОСОВ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация. В работе разработан и обоснован комплексный подход к целевой оптимизации технологического процесса обработки рабочих колес насосов, основанный на использовании специализированного программного обеспечения и методов многокритериальной оптимизации. Проведена формализация задачи оптимизации с учетом геометрических, кинематических и динамических факторов обработки. Сформирована система целевых функций и ограничений, отражающих требования к точности, качеству поверхности, производительности и ресурсу инструмента. Предложены математические модели и алгоритмы оптимизации параметров обработки и траектории инструмента. Показано, что интеграция методов численной оптимизации в CAM-системы обеспечивает повышение эффективности обработки сложнопрофильных деталей.

Ключевые слова: Рабочее колесо, Насос, Технологический процесс, Целевая оптимизация, CAM-системы.

Khitrov V.A.
Postgraduate Student
Pacific State University
Russia, Khabarovsk
Khitrov-2306@yandex.ru

SOFTWARE-BASED METHODS OF TARGET OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PROCESSING PUMP IMPELLERS

Abstract. This paper develops and validates a comprehensive approach to targeted optimization of the pump impeller machining process, based on specialized software and multi-criteria optimization methods. The optimization problem is formalized, taking into account geometric, kinematic, and dynamic machining factors. A system of objective functions and constraints is developed, reflecting requirements for accuracy, surface quality, productivity, and tool life. Mathematical models and algorithms for optimizing machining parameters and tool paths are proposed. It is demonstrated that the integration of numerical optimization methods into CAM systems improves the machining efficiency of complex parts.

Keywords: Impeller, Pump, Technological process, Target optimization, CAM systems.

Современное машиностроение, особенно в области производства насосного оборудования, характеризуется значительно высокой степенью сложности геометрии деталей, строгими требованиями к качеству поверхности и точности изготовления. Одной из наиболее ответственных и технологически сложных деталей является рабочее колесо насоса, имеющего пространственно-сложную винтовую поверхность. Оно напрямую влияет на гидравлические характеристики, КПД и долговечность оборудования. В связи с этим особую актуальность приобретает задача оптимизации технологических процессов обработки рабочих колес. Их сложная пространственная форма и высокая чувствительность к качеству обработки диктуют особые требования к технологическим процессам. Следовательно, для достижения наилучших эксплуатационных характеристик необходима разработка специализированных программных комплексов, учитывающих не только геометрию обрабатываемой детали, но и особенности течения жидкости, нагрузочные условия и условия эксплуатации изделия в целом. Рабочие колеса насосов относятся к числу сложнопрофильных деталей, характеризующихся пространственно-криволинейной геометрией и высокими требованиями к точности изготовления. Качество их обработки напрямую влияет на гидродинамические характеристики насосного оборудования, включая КПД, кавитационную стойкость и ресурс работы.

Традиционные методы проектирования технологических процессов зачастую опираются на опыт инженеров и эмпирические подходы, что не всегда обеспечивает максимальную эффективность. Развитие цифровых технологий, CAD/CAM/CAE-систем и методов математического моделирования открыло новые возможности для целевой оптимизации обработки сложнопрофильных деталей. Использование специализированного программного обеспечения позволяет не только автоматизировать проектирование, но и учитывать множество факторов: от кинематики станков до термодеформаций и динамики резания.

Современные тенденции развития машиностроения предполагают широкое использование программных средств автоматизированной подготовки производства, в частности CAM-систем, позволяющих формировать управляющие программы для станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Однако стандартные алгоритмы генерации траекторий инструмента не всегда обеспечивают оптимальные параметры обработки. Таким образом оптимизированное программное обеспечение с оптимальным подбором скоростей вращения шпинделя, подачи инструмента, глубины резания и траектории перемещения позволяет минимизировать время обработки, износ инструмента, а главное формулироваться как минимизация полного производственного цикла при сохранении или улучшении качества поверхности и точности формы

В связи с этим актуальной задачей является разработка и применение методов целевой оптимизации технологических процессов обработки рабочих колес насосов на основе программного обеспечения.

Целью настоящей работы является разработка и анализ существующих методов целевой оптимизации технологического процесса обработки рабочих колес насосов на основе программного обеспечения, а также формирование научно обоснованных подходов к интеграции приближенных математических моделей, алгоритмов оптимизации и цифровых технологий в единый производственный контур, который позволит адаптировать и оптимизировать процесс обработки.

С точки зрения технологической обработки, основными проблемами являются обеспечение равномерного съема материала, предотвращение вибраций, контроль температурных деформаций и достижение заданной шероховатости поверхности. Эти факторы тесно взаимосвязаны и оказывают взаимное влияние, что существенно усложняет задачу выбора оптимальных режимов обработки.

Формально технологический процесс можно представить в виде отображения: $T: X \to Y$, где X – множество входных параметров, включающее геометрические характеристики, режимы резания, свойства материала, и параметры инструмента, а Y – множество входных показателей качества, таких как точность, шероховатость, остаточные напряжения и производительность.

Рабочие колеса насосов представляют собой детали сложной пространственной формы, включающие лопатки с криволинейной поверхностью, внутренние каналы и переходные зоны. Основные особенности:

- сложная геометрия поверхностей (3D-криволинейные профили);
- высокие требования к шероховатости;
- необходимость соблюдения точных гидродинамических параметров;
- труднодоступные зоны обработки;
- требования к балансировке.

Такие особенности делают невозможным применение простых технологических решений и требуют использования многоосевых станков с числовым программным управлением (ЧПУ).

Так как технологический процесс обработки рабочих колес насосов представляет собой сложную многопараметрическую систему, в которой входные управляющие воздействия определяют совокупность выходных характеристик качества, производительности и стабильности обработки.

Технологический процесс обработки можно представить в виде векторной функции:

$$Y = F(X, G, C) \quad (1)$$

где X – вектор управляемых параметров (режимы резания, параметры) траектории; G – геометрия детали; C – ограничения системы (жесткость станка, характеристики инструмента); Y – вектор выходных параметров (точность, шероховатость, время обработки и др.).

Задача оптимизации формулируется как:

$$\min_x F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)\} \quad (2)$$

при ограничениях:

$$g_i(X) \leq 0, i = 1, \dots, m$$

$$h_i(X) = 0, j = 1, \dots, k$$

И формулируется как поиск такого вектора параметров, при котором достигается экстремум совокупности целевых функций, где область допустимых решений определяется ограничениями, а каждая компонента отражает отдельный аспект технологического процесса.

Формализация позволяет перейти от эмпирического подбора режимов к строгой математической постановке задачи, что является основной для применения численных методов оптимизации и интеграции алгоритмов.

Шероховатость поверхности является одним из ключевых выходных параметров технологического процесса обработки, поскольку напрямую влияет на гидродинамическую эффективность, кавитационную стойкость и энергетические потери. Влияние шероховатости на гидродинамическую эффективность проявляется, прежде всего, через изменение характера течения жидкости вдоль поверхности: микронеровности и провоцируют отрыв пограничного слоя и формирование локальных вихревых зон, что может нарушать ламинарное течение и переводить его в турбулентное даже при относительно низких скоростях потока.

Так для лопаточных систем центробежных насосов требования к шероховатости поверхности, которых, как правило, находятся в диапазоне $R_a = 0.4 \dots 3.2\ \mu m$, при этом для высокоэффективных насосов предпочтительны значения ближе к нижней границе диапазона.

Поэтому формирование шероховатости при фрезерной обработке является результатом суперпозиции нескольких факторов: геометрического следа инструмента, деформаций в зоне резания, вибраций технологической системы, дискретизации траекторий в CAM-системе, погрешностью ориентации инструмента.

Поэтому фактическая шероховатость для идеализированного случая цилиндрического фрезерования может быть приближенно выражена как:

$$R_a \approx \frac{f_z^2}{8R} \tag{3}$$

где f_z – подача на зуб; R – радиус инструмента.

Однако для сложнопрофильных поверхностей необходимо учитывать геометрию контакта:

$$R_a = f(f_z, k, \theta, R) \tag{4}$$

где k – угол наклона инструмента; θ – угол контакта.

Однако важно учитывать, что при изменении ориентации инструмента в 5-осевой обработке эффективный радиус резания меняется, что напрямую влияет на микрогеометрию поверхности. Поэтому оптимизация должна учитывать не только режимы резания, но и кинематику инструмента.

Погрешность отклонения формы зачастую возникает из-за аппроксимации поверхности дискретными траекториями инструмента и динамических погрешностей станка. Снижение шага траектории уменьшает ошибку, но увеличивает время обработки. Таким образом отклонение формы выражается как:

$$\Delta = \|S_{CAD} - S_{mach}\| \tag{5}$$

где S_{CAD} – номинальная поверхность; S_{mach} – полученная поверхность.

С учетом дискретности траектории режущего инструмента вышеизложенное уравнение можно выстроить подругому:

$$\Delta \approx \max_i \left\| r_i^{CAD} - r_i^{tool} \right\|$$

Таким образом, шероховатость поверхности при обработке рабочих колес насосов представляет собой результат сложного взаимодействия геометрических, динамических и управляющих факторов. Ее минимизация требует комплексной оптимизации параметров резания, траектории инструмента и стратегии обработки в CAM-системах.

Но также необходимо учитывать, что одним из важнейших ключевых элементов оптимизации является адекватное моделирование процесса резания. Силовые параметры процесса могут быть описаны зависимостью: $Fc = Kc * ap * f^m$, где Fc – сила резания; Kc – коэффициент, зависящий от материала; ap – глубина резания; f – подача;

Температура в зоне резания является одним из определяющих факторов, влияющих на качество обработки, стойкость инструмента и точность

геометрии при изготовлении рабочих колес насосов. В условиях обработки сложнопрофильных поверхностей, характерных для лопаточных систем, температурные эффекты приобретают особую значимость вследствие неравномерности распределения тепловых потоков, переменной толщины снимаемого слоя и сложной кинематики движения инструмента.

Физическая природа возникновения температуры в зоне резания связана с преобразованием механической энергии в тепловую. Основными источниками тепловыделения являются пластическая деформация срезаемого слоя, трение стружки о переднюю поверхность инструмента и трение задней поверхности инструмента о обработанную поверхность. В общем случае тепловой баланс процесса можно представить в виде:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (6)$$

где Q_1 – тепло, выделяемое при пластической деформации материала; Q_2 – тепло от трения стружки; Q_3 – тепло от трения инструмента о заготовку.

Распределение температуры в зоне резания является крайне неравномерным и зависит от множества факторов, включая режимы обработки, свойства материала, геометрию инструмента и условия охлаждения. Максимальная температура, как правило, наблюдается в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Для количественного описания температуры использовалась эмпирическая зависимость: $T = C * v^a * f^b * a^y$.

Анализ данной зависимости показывает, что наибольшее влияние на температуру оказывает скорость резания. Это связано с тем, что увеличение скорости приводит к росту интенсивности пластической деформации и трения, а также сокращает время теплоотвода из зоны контакта. В то же время увеличение подачи и глубины резания приводит к росту объема деформируемого материала, что также способствует повышению температуры, но в меньшей степени.

Более детализированное описание температурного поля может быть получено на основе уравнения теплопроводности:

$$\rho * c * \left(\frac{\delta T}{\delta t}\right) = \alpha * \Delta^2 T + q \quad (7)$$

где ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость, a – коэффициент теплопроводности; q – удельная мощность тепловыделения. Решение данного уравнения с соответствующими граничными условиями позволяет определить распределение температуры в инструменте, стружке и заготовке.

Важным аспектом является распределение тепловых потоков между элементами системы. Экспериментально установлено, что значительная часть тепла уносится стружкой (до 60–80%), тогда как оставшаяся часть распределяется между инструментом и заготовкой. Это обстоятельство имеет

принципиальное значение при выборе режимов обработки, поскольку чрезмерный нагрев инструмента приводит к ускоренному износу и снижению точности обработки.

Температура оказывает существенное влияние на механические свойства материала. При повышении температуры снижается предел текучести, что облегчает процесс резания, однако одновременно возрастает вероятность образования прижогов, изменения структуры материала и возникновения остаточных напряжений. В случае обработки рабочих колес насосов – это может привести к ухудшению гидродинамических характеристик и снижению ресурса изделия.

С точки зрения стойкости инструмента температурный фактор является определяющим. Зависимость скорости износа инструмента от температуры может быть описана экспоненциальной функцией:

$$W = W_0 * \exp\left(-\frac{E}{R*T}\right) \quad (8)$$

где W – скорость износа; E – энергия активации процесса износа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура. Данная зависимость показывает, что даже незначительное повышение температуры может привести к существенному увеличению скорости износа.

В условиях высокоскоростной обработки, характерной для современных производств, температурные эффекты усиливаются. Это требует применения эффективных методов охлаждения, включая использование смазочно-охлаждающих жидкостей, минимального количества смазки (MQL) и криогенных технологий. Однако применение охлаждения также должно быть оптимизировано, поскольку чрезмерное охлаждение может вызывать термические напряжения и деформации.

Современные программные системы позволяют моделировать температурные поля в зоне резания с использованием метода конечных элементов. Это дает возможность учитывать сложную геометрию инструмента и детали, а также нелинейные свойства материалов. В рамках таких моделей решается система уравнений, включающая механику деформируемого твердого тела и теплопереноса. Интеграция таких моделей в программное обеспечение позволяет проводить численные эксперименты и оптимизировать режимы обработки с учетом температурных ограничений. В рамках современных исследований активно развивается направление использования методов машинного обучения для прогнозирования температуры в зоне резания, позволяющие с высокой точностью оценивать температурные условия без проведения сложных численных расчетов. Это особенно важно для реализации адаптивного управления технологическим процессом в реальном времени.

Таким образом, температура в зоне резания является комплексным параметром, оказывающим влияние на все аспекты технологического про-

цесса обработки рабочих колес насосов. Ее учет в задачах оптимизации позволяет повысить точность, увеличить стойкость инструмента и обеспечить стабильность качества продукции. Развитие методов моделирования и прогнозирования температурных полей, а также их интеграция в программные системы представляет собой важное направление научных исследований, имеющее значительный потенциал для практического применения в машиностроении

Время обработки является одним из ключевых критериев эффективности технологического процесса, напрямую влияющим на производительность и себестоимость изготовления рабочих колес насосов. В отличие от упрощённых оценок, в реальных условиях оно определяется не только длиной траектории и подачей, но и кинематическими возможностями станка, характером траектории, а также динамическими ограничениями системы.

Поэтому для дальнейшей системы время обработки задается как:

$$T = \sum \frac{L_i}{V_i} + T_{aux} \quad (9)$$

где L_i – длина траектории; V_i. – скорость подачи

Время обработки напрямую влияет на себестоимость изделия, поэтому необходимо важно сократить время, затрачиваемое на весь технологический процесс фрезерования. Так же необходимо учитывать следующие факторы:

1. Увеличение подачи не всегда уменьшает время обработки, из-за ограничений ускорения станка фактическая подача может быть ниже заданной.
2. Геометрия траектории играет ключевую роль, участки высокой кривизны существенно увеличивают время.
3. Оптимизация стратегии более эффективна, чем увеличение режимов, сокращение длины траектории дает больший эффект, чем рост подачи.
4. Дискретизация – скрытый фактор увеличения времени, чрезмерное дробление траектории снижает эффективность обработки.

Таким образом, время обработки является сложной функцией, зависящей не только от режимов резания, но и от геометрии траектории и динамики станка. Его минимизация требует комплексной оптимизации, включающей как параметры резания, так и структуру траектории инструмента.

Само программное обеспечение выступает не просто инструментом автоматизации, а полноценной интеллектуальной средой, в которой осуществляется интеграция этапов проектирования, анализа и реализации обработки. Современные CAD/CAM/CAE-системы обеспечивают непрерывную цифровую цепочку от геометрического моделирования до генерации управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением. Это позволяет существенно сократить влияние человеческого фактора, минимизировать вероятность ошибок и обеспечить воспроизводимость результатов.

Особую значимость программное обеспечение приобретает в задачах многокритериальной оптимизации. Обработка рабочих колес насосов характеризуется необходимостью одновременного учета большого числа взаимосвязанных параметров, включая геометрию лопаточного аппарата, динамику процесса резания, тепловые деформации, износ инструмента и кинематические ограничения оборудования. Без использования вычислительных методов и алгоритмов оптимизации решение подобных задач становится практически невозможным. Программные средства позволяют формализовать критерии оптимальности и осуществлять поиск наилучших решений в многомерном пространстве параметров, что обеспечивает качественно новый уровень технологического проектирования. В многокритериальной постановке задача принимает вид:

$$F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots f_n(x)\} \to opt \quad (10)$$

где $f_1(x)$ – описывает время обработки; $f_2(x)$ – износ инструмента; $f_3(x)$ – отклонение геометрии.

Практическая эффективность разработанных методов целевой оптимизации технологического процесса обработки рабочих колес насосов на основе программного обеспечения определяется их способностью обеспечивать измеримое улучшение ключевых производственных показателей в условиях реального машиностроительного производства. Внедрение предложенного подхода, основанного на интеграции математических моделей, алгоритмов многокритериальной оптимизации и цифровых инструментов моделирования, позволяет существенно повысить устойчивость и управляемость процесса обработки сложнопрофильных поверхностей. Дополнительный эффект достигается за счет повышения стойкости режущего инструмента. Снижение интенсивности износа обеспечивается за счет учета температурных и силовых факторов в процессе оптимизации. Это приводит к увеличению периода стойкости инструмента. Важным практическим результатом является повышение точности обработки и качества поверхности. Оптимизация параметров процесса с учетом динамических и тепловых явлений позволяет минимизировать отклонения формы.

С экономической точки зрения применение разработанных методов приводит к снижению себестоимости изготовления изделий. Это достигается за счет комплексного эффекта: уменьшения времени обработки, снижения износа инструмента, сокращения числа дефектных изделий и повышения общей эффективности использования оборудования. В отличие от множества существующих методов управления себестоимостью продукции, которые рассматривают затраты, понесенные в процессе создания продукции на предприятии, в современных условиях более адекватным способом управления затратами является исследование и оптимизация затрат по всем стадиям создания продукции

Научная эффективность исследования определяется вкладом в развитие теории и методов оптимизации технологических процессов обработки сложнопрофильных деталей. В работе предложен комплексный подход,

объединяющий детерминированные и стохастические модели, что позволяет учитывать реальную вариативность условий производства.

Существенный вклад в науку представляет интеграция инновационного метода машинного обучения в задачи оптимизации. Использование моделей вида: $\hat{Y} = f(X, \theta)$, позволяет осуществлять прогнозирование параметров процесса и адаптивную корректировку режимов обработки. Это открывает перспективы для создания самообучающихся технологических систем, способных к автономной оптимизации.

Кроме того, научная значимость работы заключается в развитии методов цифрового моделирования и концепции цифрового двойника технологического процесса. Предложенные подходы позволяют создавать виртуальные модели, адекватно отражающие физические процессы, и использовать их для проведения численных экспериментов и оптимизации без вмешательства в реальное производство.

Разработанные математические модели, включая модели тепловых и динамических процессов, расширяют существующие представления о механизмах формирования качества поверхности и износа инструмента. Это способствует углублению теоретической базы технологии машиностроения и созданию новых направлений исследований.

Проведенное исследование, посвященное разработке методов целевой оптимизации технологического процесса обработки рабочих колес насосов на основе программного обеспечения, позволяет сформулировать ряд обобщающих выводов теоретического и прикладного характера, отражающих как достигнутые результаты, так и перспективы дальнейшего развития данного научного направления.

В первую очередь установлено, что обработка рабочих колес насосов представляет собой сложную многопараметрическую задачу, в которой ключевую роль играет взаимосвязанное влияние геометрических, кинематических, динамических и тепловых факторов. Традиционные подходы к проектированию технологических процессов, основанные на эмпирических зависимостях и нормативных рекомендациях, не обеспечивают требуемого уровня эффективности в условиях современного высокоточного производства. Это обусловливает необходимость перехода к формализованным методам анализа и оптимизации, реализуемым с использованием специализированного программного обеспечения.

В ходе работы показано, что применение математических моделей различной физической природы позволяет адекватно описывать основные закономерности процесса резания. Использование зависимостей для расчета сил резания, температурных полей, износа инструмента и динамики технологической системы обеспечивает возможность комплексного анализа условий обработки. При этом особое значение имеет учет температурного фактора, который оказывает определяющее влияние на стойкость инструмента, качество поверхности и формирование остаточных напряжений.

Разработанная постановка задачи целевой оптимизации в многокритериальной форме позволила учесть противоречивый характер требований к

технологическому процессу. Введение векторной целевой функции и применение принципа Парето-оптимальности обеспечивают поиск компромиссных решений, оптимальных по совокупности критериев. Дополнительное включение в целевую функцию показателей устойчивости, таких как дисперсия выходных параметров, позволило повысить надежность технологического процесса в условиях вариативности производственной среды.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает высокую эффективность использования программного обеспечения в задачах оптимизации технологических процессов обработки сложнопрофильных деталей и формирует научную основу для дальнейшего развития интеллектуальных производственных систем. Реализация предложенных подходов способствует повышению конкурентоспособности машиностроительных предприятий и соответствует современным тенденциям цифровизации промышленности.

Список литературы

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000, – 320 с.

2. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А.А. Маталин. М. – Л.: Машгиз, 1956.- 239 с.

3. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием. Физические основы / А.А. Рыжкин. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1995. 242 с.

4. Якобсон М.О. Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке / М.О. Якобсон. М.: Машгиз, 1956. – 235 с.

5. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин,- Киев: Техника, 1971,- 165 с.

6. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986 г. 656 с.

7. Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Елкин М.С. Методика комплексного экспериментального исследования параметров качества поверхностного слоя деталей, обработанных концевыми фрезами // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2015. № 3(34). С. 63–68.

8. Виттенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. Л.: Судостроение, 1971. 105 с.

9. Степанов М. А. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. 229 с.

10. Горанский Г.К. Расчет режимов резания при помощи электронно-вычислительных машин. Минск: Гос. изд-во БССР, 1963. 191 с.

11. Якобс Г.Ю., Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания / Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

12. ISO 10303-1:1994. Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 1: Overview and fundamental principles.

13. ISO 230-1:2012. Test code for machine tools – Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions.

14. Обеспечение точности сложнопрофильных деталей на обрабатывающих центрах 3+2 координаты (с соавтором М. Р. Гимадеевым), Хабаровск, 2015, т. 6, №1, с. 175–178.

15. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, 1986. – 544с.

СЕКЦИЯ 5
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАЗВИТИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Богданчиков И.Ю.
к.т.н., доцент, научный сотрудник института аграрных исследований
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
ibogdanchikov@hse.ru
Юдина А.В.
студент
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
anna.yudina.2002@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСНАЩЕННОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК НА СТАБИЛЬНОСТЬ КАЧЕСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ: МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЦИИ В СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Аннотация. В статье исследуется причинно-следственная связь между уровнем технической готовности производственного оборудования агропромышленного комплекса и стабильностью качественных характеристик выпускаемой продукции. На примере зернового сегмента показано, что износ машинно-тракторного парка коррелирует с ростом доли отклонений по влажности, натуре, сорной примеси и механической повреждённости. Предложена эмпирическая модель прогнозирования качественных рисков на основе возрастной структуры техники и коэффициента операционной готовности. Разработаны методические рекомендации по интеграции индикаторов технического состояния в цикл PDCA системы менеджмента качества, что позволяет трансформировать реактивный контроль брака в проактивное управление параметрами воспроизводимости процессов.

Ключевые слова: техническая оснащённость, качество сельскохозяйственной продукции, коэффициент технической готовности, система менеджмента качества, машинно-тракторный парк, воспроизводимость процессов, риск-менеджмент.

Bogdanchikov I.Yu.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Researcher of the Institute of Agricultural Research
HSE University
Russia, Moscow
ibogdanchikov@hse.ru
Yudina A.V.
Student
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
anna.yudina.2002@mail.ru

TECHNOLOGICAL MODERNIZATION AS A TOOL FOR QUALITY MANAGEMENT IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Abstract. The article examines the causal relationship between the level of technical readiness of production equipment in the agro-industrial complex and the stability of quality characteristics of the

products. Using the example of the grain sector, it is shown that the wear and tear of the machine and tractor fleet correlates with an increase in the proportion of deviations in moisture, test weight, weed admixture, and mechanical damage. An empirical model for predicting quality risks based on the age structure of equipment and the operational readiness coefficient is proposed. Methodological recommendations for integrating technical condition indicators into the PDCA cycle of the quality management system have been developed, which makes it possible to transform reactive defect control into proactive management of process reproducibility parameters.

Keywords: technical equipment, agricultural product quality, technical readiness coefficient, quality management system, machine and tractor fleet, process reproducibility, risk management.

В современных условиях трансформации агропромышленного комплекса парадигма управления смещается от наращивания валовых показателей к обеспечению предсказуемого и воспроизводимого качества продукции. Качество сельскохозяйственного сырья и готовых товаров перестаёт быть исключительно результатом агротехнических или селекционных решений; оно формируется на каждом этапе производственной цепочки: от обработки почвы до послеуборочной доработки, транспортировки и хранения. Ключевым материальным носителем стандартов качества в этой цепи выступает техническая оснащённость предприятий [1, 2]. Современный парк машин и оборудования, оснащённый системами точного контроля, автоматизированной калибровкой и датчиками мониторинга, позволяет минимизировать антропогенный фактор, стабилизировать физико-химические параметры сырья и обеспечивать соответствие требованиям технических регламентов и внутренних стандартов. В контексте ужесточения требований к пищевой безопасности и прослеживаемости техническое перевооружение становится не просто инструментом повышения производительности, а базовым условием функционирования эффективной системы менеджмента качества (СМК).

Несмотря на позитивные макроэкономические тренды, отрасль сталкивается с системными ограничениями, напрямую влияющими на стабильность выпускаемой продукции. Анализ состояния машинно-тракторного парка демонстрирует сохраняющуюся высокую долю оборудования, эксплуатируемого сверх нормативного срока службы [3, 4]. Устаревшая техника характеризуется низкой операционной технической готовностью, что в периоды пиковых нагрузок приводит к срыву агротехнических сроков [5, 6], неравномерности выполнения операций и росту отклонений на этапах уборки и послеуборочной обработки [7, 8]. Практика показывает, что снижение коэффициента технической готовности ниже плановых значений сопровождается не только экономическим ущербом, но и качественными потерями: повышением влажности зерна, увеличением доли механически повреждённых зёрен, нарушением целостности продукции и, как следствие, рисками несоответствия требованиям ГОСТ и ТР ТС 021/2011. Существующие подходы к оценке технического состояния чаще ориентированы на рас-

чёт производственных потерь в денежном выражении, тогда как количественная связь между параметрами технической оснащённости и стабильностью качественных характеристик продукции остаётся недостаточно формализованной в научно-практическом дискурсе [9, 10].

Научная новизна настоящего исследования заключается в переосмыслении роли технической готовности оборудования через призму рискориентированного подхода к управлению качеством. В отличие от традиционных методик, оценивающих износ парка исключительно через призму себестоимости или объёмов выпуска, в данной работе техническая оснащённость рассматривается как детерминанта выполнения требований СМК на критических контрольных точках производственной цепочки. Интеграция показателей технической готовности в цикл PDCA позволяет перевести управление качеством из реактивного режима в проактивный. Особое внимание уделяется механизмам влияния цифровых систем мониторинга, автоматизированных систем дозирования и климат-контроля хранилищ на воспроизводимость стандартов качества.

Цель статьи – обосновать механизмы влияния технической оснащённости предприятий АПК на качество продукции и предложить методические подходы к интеграции параметров технической готовности в систему управления качеством. Для достижения цели поставлены задачи:

1. проанализировать текущее состояние и динамику обновления технического парка;

2. выявить причинно-следственные связи между уровнем технической готовности оборудования и стабильностью качественных показателей сырья;

3. разработать рекомендации по внедрению технических индикаторов в процессы внутреннего аудита и риск-менеджмента предприятий.

Объект исследования – техническое обеспечение производственных процессов АПК.

Предмет исследования – влияние параметров технической оснащённости на формирование качества сельскохозяйственной продукции.

Теоретико-методологические основы связи технической готовности и параметров качества

В современной теории управления качеством оборудование рассматривается не как пассивный инструмент, а как активный элемент технологической системы, определяющий границы воспроизводимости процессов. Согласно принципам ГОСТ Р ИСО 9001-2015, стабильность характеристик продукции напрямую зависит от управляемости среды производства, где техническое состояние машин выступает ключевым фактором вариабельности. В агропромышленном производстве это проявляется через несколько механизмов:

1. Точность выполнения агротехнических операций. Например, применение комплексов с электронным дозированием и автоматической регулировкой глубины закладки семян гарантирует «дружные» (равномерные) всходы, что отражается на минимальной амплитуде колебаний по белку и клейковине. Если же используется изношенная техник, отклонение реальной нормы от заданной может достигать ±15% и более, что изначально программирует неоднородность зерновой массы прямо в поле.

2. Влияние технической готовности на сроки уборки. Соблюдение оптимальных сроков уборки жёстко лимитируется коэффициентом технической готовности ($К_{тг}$) [11]. Падение этого показателя заставляет хозяйства производить уборку за пределами агросроков, что отражается на дополнительных издержках [10].

3. Минимизация механических повреждений. Парк комбайнов, возраст которого более 8…10 лет, характеризуется критическим износом молотильно-сепарирующих узлов, что выражается в повышенном травмировании зерновок. Отраслевые испытания фиксируют: переход с техники уровня $К_{тг}$=0,6 на класс $К_{тг}$=0,9 сокращает долю повреждённых зёрен с 4,2% до 1,1%. Именно этот разрыв часто становится решающим при классификации продукции по ГОСТ 9353-2016 (первый или второй класс).

4. Инфраструктура хранения как фактор сохранения качества. Величина постуборочных потерь качества напрямую производна от исправности зернохранилищ, дееспособности систем активного вентилирования и корректности работы климатических датчиков [12]. Сбои любого из элементов этой триады сводят на нет усилия селекционеров и агрономов, закладывая скрытую порчу уже заложенной на хранение партии [13, 14].

Таким образом, техническая оснащённость выступает материальным фундаментом СМК: без стабильного оборудования невозможна воспроизводимость процессов, а без воспроизводимости невозможен статистический контроль качества.

Результаты исследования

Диагностика технического состояния парка и его влияние на качественные отклонения

Анализ текущего состояния машинно-тракторного парка в ключевых зерносеющих регионах показывает сохраняющуюся неравномерность обновления. По данным отраслевой статистики за 2023–2025 гг., доля комбайнов и тракторов старше 10 лет варьируется от 35% до 58% в зависимости от региона. При этом нормативная нагрузка на единицу техники в пиковые периоды уборки превышает рекомендуемые значения в 2…2,5 раза, что форсирует износ и снижает операционную готовность даже статистически исправного парка [1–9].

Необходимо чётко разделять две категории:

1. Статическая исправность – это процент машин, у которых на дату обследования не зафиксировано задокументированных неполадок. По областям Центрального федерального округа данный индикатор в среднем лежит в коридоре 78…85%.

2. Операционная техническая готовность ($К_{тг}$) – вероятность того, что техника безостановочно отработает в режиме максимальных нагрузок, принимая во внимание внезапные поломки, продолжительность планового технического обслуживания и уровень подготовки механизаторов. С качеством конечной продукции прямой связи не демонстрирует статическая исправность – определяющую роль играет именно $К_{тг}$.

На рисунке 1 показано, как требуемая длительность уборочной кампании (заданная агротехнологическими нормативами) обуславливает и парк задействованной техники, и масштаб недобора урожая.

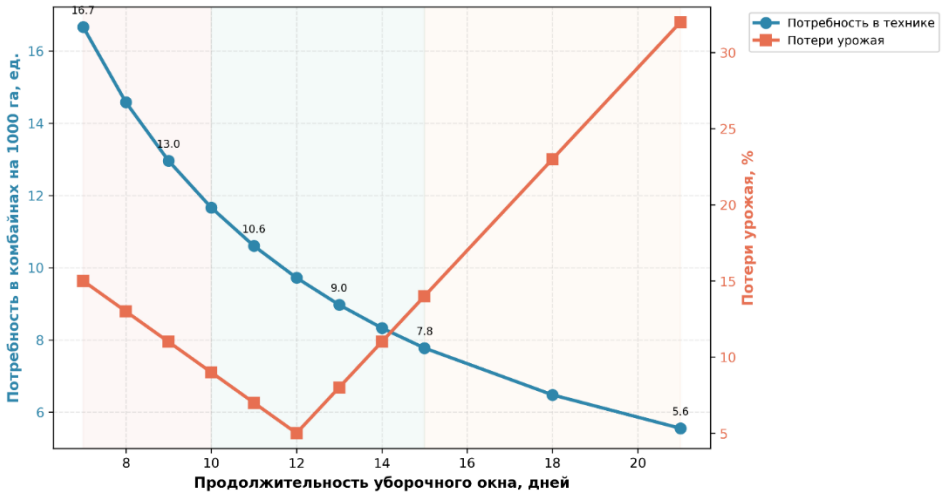


Рис. 1. Влияние продолжительности уборочных работ согласно агротехнологическим требованиям на потребность в технике и потери урожая

Графическая модель на рисунке 1 иллюстрирует нелинейный отклик потребного количества техники на продолжительность периода уборки. В области экстремально коротких сроков (менее 10 дней), типичных для неблагоприятной погоды, нужда в комбайнах растёт по экспоненте, достигая 16,7 ед. на 1000 га, а потери зерна уходят за отметку 15%. Оптимум же лежит в диапазоне 10–15 дней: здесь потери удаётся удержать в пределах 5% при сбалансированной нагрузке на парк. Смещение в сторону затяжных сроков (свыше 15 дней) тоже провоцирует рост потерь, хотя и снижает пиковую потребность в машинах.

Выявленная закономерность доказывает: единственным буфером, дающим хозяйству возможность уложиться в агротехнически оптимальное окно даже при его вынужденном сжатии, служит высокий коэффициент технической готовности ($К_{тг}$). Отсюда следует, что оценку текущего состояния машинного парка необходимо начинать именно с анализа его резервной способности поддерживать этот буфер.

Опыт Рязанской области показывает, что при реальной нагрузке около 440 га на комбайн операционный $К_{тг}$ в уборочный сезон опускается до уровня 0,6…0,65, хотя формальная статическая исправность парка зафиксирована на 81%. Построенная на данных 2020–2024 гг. [1–3, 10] эмпирическая модель отражает нелинейный характер падения $К_{тг}$ по мере увеличения срока эксплуатации N (лет):

$$К_{тг} = 1 - 0{,}0025 \cdot N^2 - 0{,}015 \cdot N, \quad (1)$$

где N – срок эксплуатации, лет.

Полученные по модели значения хорошо согласуются с отраслевыми индикаторами:

- машины, эксплуатируемые менее 3 лет оперируют в диапазоне $К_{тг}$ =0,95…1,0, где качественные отклонения минимальны;
- после 8 лет эксплуатации $К_{тг}$ снижается до 0,75, что уже требует резервирования и чревато срывами агросроков;
- при эксплуатации более 10 лет $К_{тг}$ становится меньше 0,65, и производственный процесс скатывается в зону нестабильности, где ухудшение качественных параметров приобретает системный характер.

Рост парка, отражённый на рис. 2, напрямую коррелирует с повышением операционного $К_{тг}$, что позволило региону трансформировать стохастические колебания урожая в управляемую производственную модель.

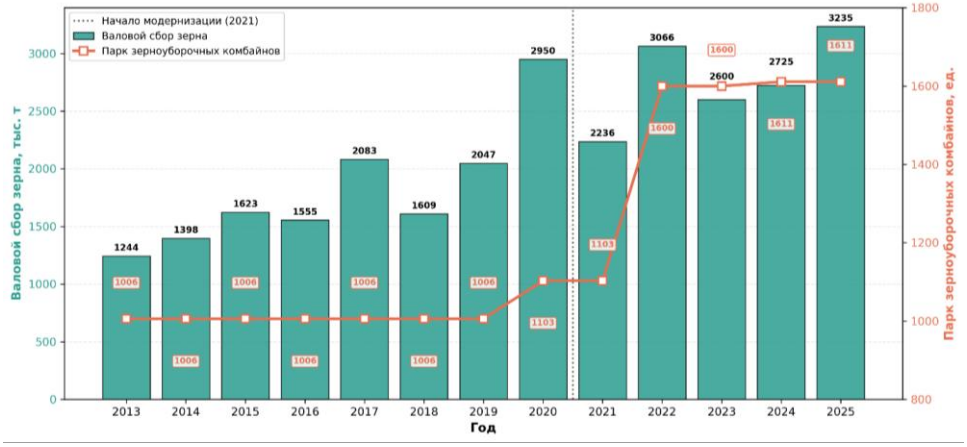


Рис. 2. Динамика валового сбора зерна и обеспеченности техникой (зерноуборочными комбайнами) на примере Рязанской области

Анализ представленной динамики (рис. 2) демонстрирует качественный переход зернового сектора региона от изменчивой от многочисленных факторов к управляемой модели производства. В период 2013–2020 гг. при стагнации парка зерноуборочных комбайнов на уровне 1000…1100 ед. валовой сбор характеризовался высокой волатильностью, что свидетельствовало о зависимости результатов от экзогенных факторов и ограниченности уборочных мощностей. Масштабное обновление техники в 2021–2022 гг. обеспечило сдвиг производственной кривой на новый базис: среднегодовой

сбор стабилизировался в диапазоне 2700…3200 тыс. т. при существенном сокращении амплитуды колебаний. Полученная зависимость подтверждает, что техническая оснащённость выступает ключевым структурным фактором, обеспечивающим соблюдение агротехнических сроков и минимизацию операционных потерь, что напрямую трансформируется в предсказуемость валового сбора и устойчивость производственной составляющей продовольственной безопасности региона.

Лабораторный контроль партий, поступающих из предприятий с различной технической вооружённостью, фиксирует устойчивую корреляцию. Там, где коэффициент технической готовности удерживается на уровне $K_{тг} \geq 0{,}85$, доля зерна, отвечающего требованиям первого класса по ГОСТ, достигает 68…74%. Если же $K_{тг}$ снижается до 0,6…0,65, выход первоклассной продукции падает до 41…45%; одновременно возрастает разброс по влажности – с ±1,1% до ±3,2%, а содержание сорной примеси увеличивается на 1,8…2,4 процентных пункта. Эти результаты подкрепляют гипотезу о том, что изношенность парка выступает латентным драйвером нестабильности качества – фактором, который не улавливается традиционной отчётностью по урожайности, но ощутимо бьёт по товарной стоимости и соблюдению нормативных требований.

Анализ агроклиматических реалий 2018–2025 гг. (Рис. 3) демонстрирует выраженную стохастичность периода, пригодного для уборки. Прослеживается жёсткая обратная связь: чем меньше дней с благоприятными условиями, тем выше фактические потери зерна.

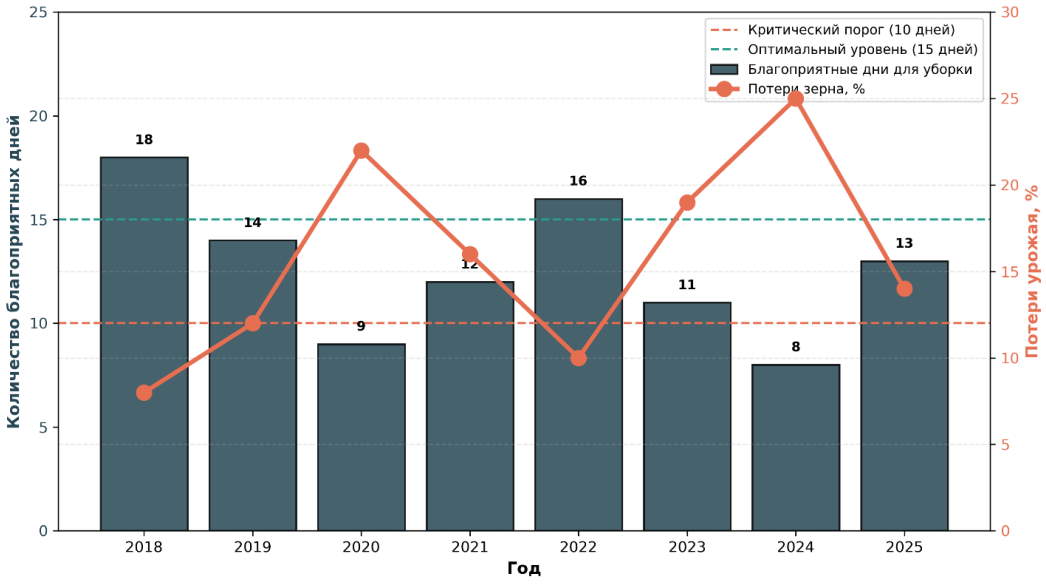


Рис. 3. Влияние погодных условий на потери урожая при уборке

Так, располагая в 2018 году 18 днями, оптимальными для уборки зерновых, хозяйства региона свели недобор урожая к минимальным значениям. Напротив, в 2020 и 2024 годах число пригодных для выхода техники дней

сжалось до 9 и 8 соответственно – обе цифры оказались ниже критического уровня дней, что стало причиной потерь до 22…25%.

Полученные данные доказывают: на фоне климатической турбулентности коэффициент технической готовности ($К_{тг}$) трансформируется из узкотехнического показателя в ключевой рычаг риск-менеджмента. Резервная мощность парка даёт возможность до предела сжать уборочный интервал, демпфируя негативное влияние погоды. Таким образом, удержание высокого $К_{тг}$ и оперативное введение резервной техники становятся императивом для сохранения качества зерна в условиях дефицита уборочного времени.

Приведённые данные указывают на устойчивую обратную связь: когда агротехнологическое окно сужается до менее чем 10 дней (что наблюдалось в 2020 и 2024 гг.), потери растут по экспоненте и преодолевают 20-процентный показатель. Отсюда следует, что в обстановке погодной нестабильности именно коэффициент технической готовности ($К_{тг}$) становится ключевым регулируемым резервом.

Только машинный парк, у которого $К_{тг}$ превышает отметку 0,85, способен сконцентрировать ресурсы так, чтобы до предела уплотнить уборочные сроки и тем самым компенсировать негативное воздействие внешних условий. Иными словами, поддержание высокого уровня $К_{тг}$ превращается в обязательное требование для сведения к минимуму качественных отклонений в критические периоды.

Для количественной оценки данного влияния предлагается расширить традиционную модель совокупных потерь, включив в неё параметр качественной деградации продукции.

Модельная оценка влияния коэффициента технической готовности на качественные потери

Для количественной оценки влияния технической оснащённости на качество предлагается расширить традиционную модель совокупных потерь, включив в неё параметр качественной деградации продукции. Совокупный индекс отклонений (ΣQ) формируется как сумма взвешенных коэффициентов потерь на этапах уборки, первичной обработки и хранения:

$$\sum Q = q_1 \cdot (1 - К_{тг}) + q_2 \cdot \Delta t + q_3 \cdot (1 - О_{скл}), \quad (2)$$

где q_1 – весовой коэффициент влияния технического состояния на механические повреждения и влажность (0,35…0,45); Δt – отклонение от оптимальных сроков уборки, дней; q_2 – коэффициент потерь качества за день задержки (0,012…0,018); q_3 – влияние состояния хранилищ (0,15…0,25); $О_{скл}$ – обеспеченность исправным климат-контролем.

Моделирование для условного хозяйства (площадь уборки 5000 га, базовая урожайность 4,2 т/га) показывает:

При $К_{тг}$=0,95: ΣQ=0,08 (8% отклонений), доля кондиционного зерна ≥72%, затраты на корректирующую сушку и очистку минимальны.

При $К_{тг}$=0,80: ΣQ=0,16 (16% отклонений), требуется дополнительная сортировка, доля второго класса снижается на 18 п.п.

При $К_{тг}$=0,60: ΣQ=0,28 (28% отклонений), значительная часть партии переходит в фуражный класс, возрастает риск микробиологической порчи, затраты на приведение к стандартам увеличиваются в 2,3…2,7 раза.

Экономический эффект от стабилизации качества при повышении $К_{тг}$ с 0,6 до 0,85 составляет 1800…2400 руб./т за счёт перехода продукции в более высокий ценовой сегмент и снижения затрат на постуборочную доработку. При этом экономия от сокращения брака компенсирует 60…70% затрат на обновление парка в течение 3–4 лет, что делает техническую модернизацию не расходной статьёй, а инвестицией в стабильность качества.

Интеграция технической оснащённости в систему менеджмента качества

Для перехода от констатации проблем к системному управлению качеством необходимо встроить параметры технической готовности в архитектуру СМК. Предлагаемый механизм включает следующие элементы:

1. Аудит критических контрольных точек (HACCP). Включить мониторинг $К_{тг}$ и возрастного состава парка в процедуру идентификации рисков на этапах уборки и первичной обработки. Установить пороговые значения: $К_{тг}$<0,75 активирует дополнительный входной контроль партий, $К_{тг}$<0,65 требует пересмотра графика уборки или привлечения резервной техники.

2. KPI технической готовности в цикл PDCA. Ввести в систему целей качества показатель «Доля операций, выполненных при $К_{тг}$≥0,85». Анализ отклонений проводить на ежемесячных совещаниях СМК, корректировать планы ТО на основе предиктивной аналитики (вибродиагностика, тепловизионный контроль, анализ масел).

3. Цифровая прослеживаемость. Интегрировать данные телематики комбайнов и датчиков хранилищ с системой электронного документооборота СМК. Это позволяет привязывать параметры каждой партии (влажность, натура, повреждения) к конкретным техническим условиям уборки и формировать базу знаний для оптимизации будущих кампаний.

4. Управление компетенциями. Стабильность качества невозможна без квалифицированных операторов. Внедрить обязательную сертификацию механизаторов по работе с цифровыми системами контроля, включить в программу обучения модули по влиянию настроек техники на физико-химические параметры сырья.

5. Государственно-частное партнёрство в сфере качества. Увязать меры субсидирования обновления парка с показателями стабильности качества. В качестве стимулирующей меры целесообразно ввести приоритетный лизинг для хозяйств, которые на протяжении трёхлетнего периода удерживают вариативность качественных характеристик продукции в границах менее 5%.

Реализация подобного подхода переводит техническую оснащённость из категории пассивных факторов риска в разряд действенного инструмента

управления качеством, гарантируя тем самым соответствие продукции актуальным рыночным и регуляторным требованиям.

Выполненное исследование доказывает, что техническая вооружённость предприятий АПК представляет собой не просто один из производственных ресурсов, а фундаментальную основу стабильности качества сельскохозяйственной продукции. Когда операционная техническая готовность парка опускается ниже отметки 0,75, это влечёт системный рост разброса физико-химических параметров, увеличение доли некондиционного сырья и удорожание послеуборочной доработки. Предложенная модель даёт количественную оценку влияния, которое возрастная структура техники и коэффициент готовности оказывают на отклонения в качестве, вводя тем самым технические показатели в плоскость риск-менеджмента СМК.

Интеграция характеристик технической оснащённости в цикл PDCA, переход к предиктивному обслуживанию и внедрение цифровой прослеживаемости формируют устойчивую взаимосвязь между состоянием оборудования и воспроизводимостью стандартов качества. В такой постановке техническое перевооружение перестаёт восприниматься исключительно как капитальные затраты и становится стратегическим инвестиционным решением, обеспечивающим конкурентоспособность продукции и на внутреннем, и на внешнем рынках. Дальнейшие изыскания могут быть направлены на разработку отраслевых нормативов, связывающих технические параметры оборудования с конкретными показателями пищевой безопасности, а также на оценку влияния автоматизированных систем дозирования и климат-контроля на стабильность качества в перерабатывающих звеньях АПК.

Список литературы

1. Юдина, А. В. Модель оценки влияния технической оснащенности на продовольственную безопасность / А. В. Юдина, И. Ю. Богданчиков, А. Н. Бачурин // Научно-технический потенциал отечественного АПК : материалы v национальной научно-практической конференции с международным участием, посвящённой памяти доктора технических наук, профессора Николая Владимировича Бышова, Рязань, 25 ноября 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2025. – С. 270–275. – EDN PTUVZM.

2. Богданчиков, И. Ю. К вопросу об обосновании рационального количества уборочных комплексов / И. Ю. Богданчиков, А. Н. Бачурин, А. В. Юдина // Научно-технические приоритеты развития АПК России: материалы 76-й международной научно-практической конференции, Рязань, 24 апреля 2025 года. – Рязань: РГАТУ, 2025. – С. 6–12. EDN: RFLLDQ

3. Рязанская область в цифрах : 2025 стат. сб. / Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Рязанской области. – Рязань : Рязанстат, 2025. – 169 с. – Режим доступа: https://62.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/%D0%A0%D1%8F%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%20%D0%B2%20%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D1%85%202025(2).pdf (дата обращения: 27.04.2026)

4. Севастьянов, Д. В. Современное состояние материально-технической базы сельского хозяйства России: основные проблемы, тенденции, импортозамещение и перспективы развития / Д. В. Севастьянов // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. – 2025. – № 3(47). – С. 74–91. – EDN SJWUKJ.

5. Уварова, Е. В. Техническая оснащенность сельского хозяйства: тенденции и перспективы / Е. В. Уварова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2024. – № 11–3(117). – С. 136–140. – DOI 10.24412/2411-0450-2024-11-3-136-140. – EDN QMXNRS.

6. Хоружий, Л. И. Основные тенденции развития и направления регулирования зернового подкомплекса в Южном федеральном округе / Л. И. Хоружий, А. А. Быков, Д. Г. Сергеев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2025. – Т. 20, № 3(79). – С. 146–154. – DOI 10.12737/2073-0462-2025-20-3-146-154. – EDN WHJQIA.

7. Водянников, В. Т. Направления совершенствования воспроизводства технического потенциала аграрного сектора экономики страны / В. Т. Водянников, Е. Ф. Малыха, Н. В. Сергеева // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 6. – С. 52–59. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-6-52-59. – EDN LQFVFJ.

8. Кузьмин, В. Н. Оценка машинно-тракторного парка в сельском хозяйстве Российской Федерации / В. Н. Кузьмин // Экономика сельского хозяйства России. – 2024. – № 5. – С. 8–15. – DOI 10.32651/245-8. – EDN UCGZFX.

9. Дьяков, С. А. Инвестиции в технологическое обновление как фактор устойчивого развития агропромышленных предприятий в трансформационной экономике / С. А. Дьяков, С. К. Власенко, С. Э. Сыпко // Вестник Академии знаний. – 2026. – № 1(72). – С. 123–129. – EDN HFAKZT.

10. Богданчиков, И. Ю. Вопросы утилизации соломы в качестве удобрения в системе органического земледелия / И. Ю. Богданчиков, А. В. Юдина // Экологическое будущее: научные подходы к органическому сельскому хозяйству : Материалы I Международной научно-практической конференции молодых ученых, р.п. Правдинский, Московская область, 10 апреля 2025 года. – р.п. Правдинский, Московская область: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2025. – С. 192–195. – EDN SUXEGU.

11. Ерохин, Г. Н. О продолжительности уборки зерновых культур / Г. Н. Ерохин, В. В. Коновский // Наука в центральной России. – 2021. – № 1(49). – С. 22–29. EDN: ZCZWPQ

12. Алифанова, В. В. Изменение качества зерна пшеницы при хранении / В. В. Алифанова, А. А. Дубровский, С. Н. Котлярова // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2022. – № 4(71). – С. 80–85. – EDN UPVGDL.

13. Марков, Ю. Ф. Контроль температуры зерна в складах напольного хранения – цифровая трансформация и предпосылки для смены парадигмы / Ю. Ф. Марков // Хлебопродукты. – 2023. – № 12. – С. 44–49. – DOI 10.32462/0235-2508-2023-32-12-44-49. – EDN ROKQTR.

14. Аналитическое исследование взаимосвязи условий хранения семенного картофеля в картофелехранилищах с последующей предпосадочной обработкой / Д. В. Колошеин, С. Н. Борычев, А. С. Попов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 93–99. – DOI 10.36508/RSATU.2024.23.75.014. – EDN HPCURG.

Абрамов Ю.Н.
к.т.н., доцент кафедры ЭМТП
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
university@rgatu.ru
Жирков Е.А.
преподаватель ФДП и СПО кафедры «ЭМТП»
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
evgenii030780@mail.ru
Угланов М.Б.
д.т.н., профессор кафедры ЭМТП
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
university@rgatu.ru

ВЫКАПЫВАЮЩИЙ РАБОЧИЙ ОРГАН КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЯ

Аннотация. Выкапывающий рабочий орган картофелекопателя состоит из лемеха, который крепится к раме подпружиненными кронштейнами, установленными на трубе квадратного сечения в поперечных отверстиях с возможностью совершать возвратно-поступательные движения и регулировки жесткости пружины. Плоский подпружиненный лемех крепится двумя параллельными по расположению кронштейнами, где на каждом винтовом соединении имеется механизм регулировки жесткости витой конической пружины сжатия. Плоская рабочая поверхность лемеха изготовлена с продольными в виде треугольников сквозными заточенными под 300 отверстиями.

Цель работы – улучшение процесса крошения клубненосного пласта, повышение качества отделения клубней от почвы и измельчение растительных остатков с последующей сепарацией через треугольнообразные заточенные отверстия при возвратно-поступательном движении лемехов.

Чтобы повысить эффективность выкапывания картофеля надо обрабатывать почву строго по технологии и использовать инновационные способы с совершенствованием рабочих органов.

Ключевые слова: рабочий орган, лемех, треугольнообразные заточенные отверстия, пружина, возвратно-поступательное движение, измельчение.

Abramov Yu.N.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the EMTP Department
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
university@rgatu.ru
Zhirkov E.A.
Lecturer of the FDP and SPO of the EMTP Department
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
evgenii030780@mail.ru
Uglanov M.B.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the EMTP Department
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
university@rgatu.ru

THE EXCAVATING WORKING BODY OF THE POTATO DIGGER

Abstract. The excavating working body of the potato digger consists of a ploughshare, which is attached to the frame by spring-loaded brackets mounted on a square tube in transverse holes with the ability to perform reciprocating movements and adjust the spring stiffness. The flat spring-loaded ploughshare is mounted with two parallel brackets, where each screw connection has a mechanism for adjusting the stiffness of a twisted conical compression spring. The flat working surface of the ploughshare is made with longitudinal triangular through-holes sharpened to 300.

The aim of the work is to improve the process of crumbling the tuberous layer, improve the quality of separation of tubers from the soil and crushing of plant residues, followed by separation through triangular sharpened holes during the reciprocating movement of the ploughshares.

To increase the efficiency of potato digging, it is necessary to cultivate the soil strictly according to technology and use innovative methods with the improvement of working organs

Keywords: working body, ploughshare, triangular sharpened holes, spring, reciprocating motion, grinding.

Картофель в России занимает второе место после хлеба, возделывается который в разных регионах нашей страны и в разных климатических условиях. Его выращивают как на лёгких песчаных почвах, так и на средних, тяжелых суглинках.

Одним из основных способов уборки картофеля является подрезание клубненосного пласта почвы выкапывающим органом, а именно плоским лемехом. Существующие выкапывающие рабочие недостаточно обеспечивают разрушение, крошение и рыхление клубненосного поверхностного слоя почвы. Это затрудняет работу основного сепарирующего элеватора. В данной статье предложен модернизированный рабочий орган картофелекопателя, представленные в виде подпружиненного плоского лемеха с продольными треуголнообразными отверстиями.

Для повышения эффективности уборки картофеля, а в частности выкапывания, необходимы инновационные способы и модернизированные рабочие органы, которые не только подрезают клубненосный поверхностный слой почвы, но и дополнительно оказывают на него механическое воздействие.

Применение таких выкапывающих рабочих органов с подпружиненным лемехом с переменной жесткостью пружин даёт возможность работы картофелекопателю в различных климатических условиях и на разных типах почв.

Известные выкапывающие рабочие органы картофелеуборочных машин и картофелекопателей имеют следующие недостатки:

1. низкая степень рыхления почвенного клубненосного пласта;
2. скопление земляного вороха на подкапывающем рабочем органе;
3. недостаточная сепарация почвы на подкапывающих рабочих органах, рабочая кромка лемеха забивается ботвой и сорняками.

На рисунке 1 представлена схема картофелекопателя с установленным выкапывающим устройством. Схема выкапывающего рабочего органа картофелекопателя представлена на рисунках 2 (вид сбоку) и 3 (вид сверху). На рисунке 4 представлены продольное (А-А) и поперечное (Б-Б) сечения лемеха.

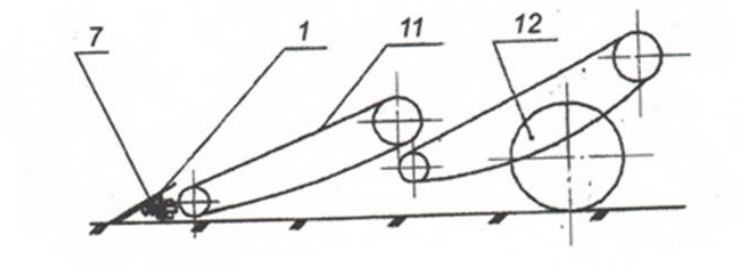


Рис. 1. Схема картофелекопателя:
1 – лемех; 7 – коническая пружина; 11 – прутковое полотно; 12 – опорное колесо

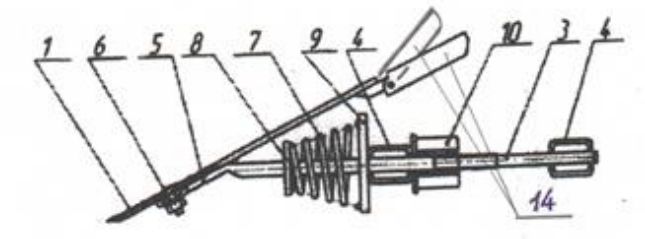


Рис. 2. Схема выкапывающего рабочего органа картофелекопателя (вид сбоку):
1 – лемех; 3 – кронштейн; 4 – поперечные опоры; 5 – лапки; 6 – болтовое соединение; 7 – коническая пружина; 8 – упорная шайба; 9 – шайба; 10 – гайка; 14 – клапана

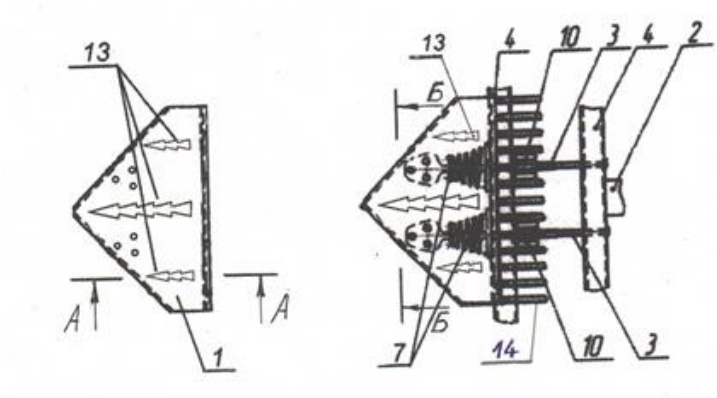


Рис. 3. Схема выкапывающего рабочего органа картофелекопателя (вид сверху):
1 – лемех; 2 – рама; 3 – кронштейн; 4 – поперечные опоры; 7 – коническая пружина; 10 – гайка; 13 – треугольнообразные отверстия; 14 – клапана

Выкапывающий рабочий орган имеет подпружиненный плоский лемех 1, который прикреплён к раме 2 двумя кронштейнами 3, расположенными последовательно на двух поперечных опорах 4. Плоский подпружиненный

лемех закреплен на лапах 5 болтовыми соединениями 6. Плоская рабочая поверхность лемеха изготовлена с продольными в виде треугольников сквозными заточенными под 30° отверстиями 13. Кронштейны через жесткие конические пружины 7 стопорятся шайбами 8, которые жёстко сидят на кронштейнах с одного конца, а с другого шайбами 9, которые свободно сидят на кронштейнах и упираются в опору 4 рамы. На кронштейнах имеются регулировочные гайки 10, которыми регулируется жесткость пружин. Лемех изготовлен с треугольнообразными отверстиями 13 с заточенными рабочими кромками снизу под углом 30° и на нем имеются клапана 14, расположенные на разной высоте, по отношению к элеватору, через один. За выкапывающим рабочим органом картофелекопателя установлен сепарирующий элеватор, который имеет прутковое полотно 11 и опорные колеса 12.

Во время работы картофелекопателя при неравномерном сопротивлении клубненосного пласта почвы на активный подпружиненный плоский лемех воздействуют переменные силы. Под действием этих сил лемех совершает возвратно-поступательные движения в продольном направлении с частотой колебаний, зависящей от структуры почвы. При перемещении клубненосного пласта от лемеха к прутковому элеватору картофельная ботва и сорняки, попадая в треугольнообразые сквозные отверстия, разрезаются на острых заточенных стенках под 30°. При передаче клубненосного пласта на элеватор клапаны лемеха, расположенные на разной высоте через один, способствуют крошению и рыхлению пласта.

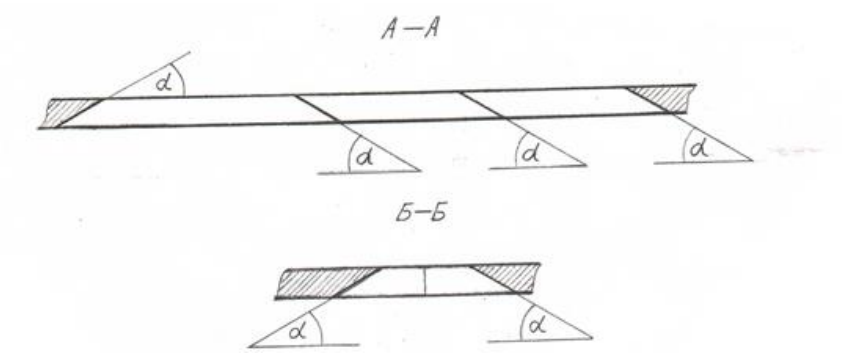


Рис. 4. Продольное (А-А) и поперечное (Б-Б) сечения лемеха

Таким образом выкапывающий рабочий орган картофелекопателя имеет отличия в том, что плоский лемех изготовлен с тремя параллельными и продольными треугольнообразными отверстиями, кромки которого заточены под углом 300. Также выкапывающий рабочий орган снабжен механизмом регулирования жесткости конической витой пружины.

При работе картофелекопателя плоский лемех с треугольнообразными отверстиями начинает активно совершать возвратно-поступательные движения. Почвенный пласт начинает разрушаться от его колебаний, а растительные остатки с частицами ботвы измельчаются рабочими заточенными кромками треугольнообразных отверстий. Клубненосный пласт перемеща-

ется к прутковому полотну основного элеватора через клапана лемеха, которые расположены на разной высоте по отношению к элеватору через один., что способствует крошению и разрыхлению почвенного пласта, а также улучшению сепарации на основном элеваторе картофелекопателя.

Список литературы

1. Исследование взаимодействия подпружиненного лемеха с частицей почвенного пласта, основанное на решении уравнения Лагранжа второго рода

2. Юдаев Ю.А., Абрамов Ю.Н., Иванкина О.П., Угланов М.Б., Байгильдеева Е.И. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3 (71). С. 117–123.

3. Математическое моделирование работы подпружиненного лемеха картофелеуборочного комбайна Абрамов Ю.Н., Костенко М.Ю., Угланов М.Б., Юдаев Ю.А. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2022. Т. 14. № 4. С. 106–113.

4. Особенности уборки картофеля / М. Н. Калимуллин, Д. М. Исмагилов, Р. Р. Багаутдинов, М. З. Салимзянов // Проблемы развития малого и среднего бизнеса на селе в условиях цифровой трансформации экономик: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Казанского ГАУ, Казань, 24–25 марта 2022 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 156–162. – EDN UTIANI.

5. Лабораторно-полевые исследования модернизированной ботвоуборочной машины БД-4М Угланов М.Б., Иванкина О.П., Попов А.С., Бышов Д.Н., Абрамов Ю.Н. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 78. С. 403–412.

6. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И. А. Успенский, Г. К. Рембалович, М. Ю. Костенко, Р. В. Безносюк // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1(49). – С. 262–269. – DOI 10.32786/2071-9485-2018-01-262-269. – EDN YZKHBJ.

7. Методика настройки картофелеуборочного комбайна / М. Ю. Костенко, А. Н. Шапошников, Н. А. Костенко, И. Н. Горячкина // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 11. – С. 45–48. – EDN NDGPQL.

8. Optimization of the energy consumption of the shredder of the tops for the sustainable development of agriculture / Y. N. Abramov, S. N. Borychev, M. Y. Kostenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volgograd, 12–14 мая 2021 года. – Volgograd, 2022. – P. 012001. – DOI 10.1088/1755-1315/965/1/012001. – EDN KJKJNL.

9. Improvement of the working bodies of the harvesting machines by means of the use of composite materials / N. Zhbanov, N. Byshow, N. Kostenko [et al.] // Bio web of conferences: International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2020. – P. 00191. – DOI 10.1051/bioconf/20201700191. – EDN TTPXWR.

Дион Кори
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
ccorydione@gmail.com
Адылина А.П.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
dmitr1eva@mail.ru
Ндиайе А.К.
д.н., профессор
Университет Шейха Анты Диопа
Сенегал, Дакар
ak.ndiaye@ucad.edu.sn
Фалль М.С.
к.ф.-м.н., доцент
Университет Шейха Анты Диопа
Сенегал, Дакар
ms.fall@ucad.edu.sn
Сов В.Р.
студент
Университет Шейха Анты Диопа
Сенегал, Дакар
vr.sow@ucad.edu.sn

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА СЕНЕГАЛА

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния современных водосберегающих технологий и применения засухоустойчивых сортов на урожайность ключевых сельскохозяйственных культур в условиях засушливого климата Сенегала. В ходе эксперимента определён оптимальный режим орошения, обеспечивающий максимальную рентабельность и экономию водных ресурсов. Дополнительно рассмотрены социально-экономические аспекты внедрения солнечной энергетики в процессы фертигации и автоматизированного полива, а также их влияние на предотвращение деградации почв.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, Сенегал, устойчивое развитие, капельное орошение, засухоустойчивые культуры, урожайность, сохранение почв, солнечная энергетика, продовольственная безопасность.

Dion Cory
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
ccorydione@gmail.com
Adylina A.P.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology, and Certification
Moscow Polytechnic University

Russia, Moscow
dmitr1eva@mail.ru
Ndiaye A.K.
Doctor of Science, Professor
Cheikh Anta Diop University
Senegal, Dakar
ak.ndiaye@ucad.edu.sn
Fall M.S.
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Cheikh Anta Diop University
Senegal, Dakar
ms.fall@ucad.edu.sn
Sov V.R.
Student
Cheikh Anta Diop University
Senegal, Dakar
vr.sow@ucad.edu.sn

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SUSTAINABLE AGRO-INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN SENEGAL

Abstract. The paper presents the results of a study of the impact of modern water-saving technologies and the use of drought-resistant varieties on the yield of key crops in the arid climate of Senegal. During the experiment, the optimal irrigation regime was determined, providing maximum profitability and saving water resources. Additionally, the socio-economic aspects of the introduction of solar energy in the processes of fertigation and automated irrigation, as well as their impact on the prevention of soil degradation, are considered.

Keywords: agro-industrial complex, Senegal, sustainable development, drip irrigation, drought-resistant crops, productivity, soil conservation, solar energy, food security.

Стремясь обеспечить продовольственную безопасность и улучшить экономические показатели, страны Западной Африки активно внедряют передовые сельскохозяйственные технологии. Особое внимание уделяется инновациям в области ирригации и селекции, отличающимся исключительным сочетанием эффективности, доступности и устойчивости к климатическим изменениям.

Ключевым преимуществом внедрения данных систем в агропромышленном комплексе (АПК) Сенегала является их высокая адаптируемость к местным почвенно-климатическим условиям. В последние годы в сельскохозяйственной отрасли наблюдается тенденция к применению интегрированных систем управления водными ресурсами при выращивании стратегически важных культур – арахиса, проса и риса.

Для получения стабильных урожаев в условиях дефицита осадков перспективно применение систем капельного орошения на базе солнечной энергии. Цель данной работы – исследовать влияние параметров режимов орошения и типа используемых семян на общую урожайность, влагоемкость почвы и экономическую эффективность фермерских хозяйств.



Рис. 1. Интеграция солнечной энергетики и «умного» капельного орошения на полях арахиса

Проблемы традиционного земледелия в условиях изменения климата

Сенегал, большая часть территории которого расположена в сахельской зоне, регулярно сталкивается с экстремальными засухами, нерегулярным выпадением осадков и прогрессирующим опустыниванием. Традиционные методы земледелия, основанные на экстенсивном использовании земель и ручном труде, становятся все менее эффективными.

Одной из главных проблем является быстрая потеря почвенной влаги и ветровая эрозия. Практика глубокой вспашки в засушливых регионах приводит к разрушению структуры почвы и снижению содержания органических веществ. Кроме того, зависимость фермеров от дождевого сезона ограничивает возможность получения нескольких урожаев в год, что напрямую влияет на продовольственную безопасность региона и доходы сельского населения.



Рис. 2. Современный анализ эффективности (Режим 1 vs Режим 4)

Методология и условия проведения эксперимента

Для исследований использовали экспериментальные участки площадью 1,0 га в регионе Тиес (Сенегал). Этот регион характеризуется типичным

сахельским климатом с коротким сезоном дождей и длительным сухим периодом. Характеристики почвенного покрова и климатические показатели приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Агрохимические показатели опытных участков

Тип почвы	Содержание гумуса,%	Уровень pH	Азот (N), мг/кг	Фосфор (P), мг/кг	Калий (K), мг/кг
Песчаные (диор)	0,6 – 0,8	6,2	15,4	22,1	85,0
Суглинистые (дек)	1,1 – 1,4	6,5	28,2	34,5	110,5

Таблица 2

Среднемесячные климатические показатели (период вегетации)

Параметр	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Средняя температура, °C	29,5	28,2	27,8	28,0
Количество осадков, мм	45	120	210	165

Инновационные системы орошения и энергообеспечения

Испытания инновационных методов выращивания проводились с применением различных режимов полива и использования биоудобрений. Обработка почвы перед посевом производилась по технологии минимальной вспашки (No-Till), которая позволяет сохранять пожнивные остатки на поверхности, уменьшая испарение влаги и защищая верхний слой от эрозии. В таблице 3 приведены режимы агротехнического воздействия, используемые при выполнении исследований.

Таблица 3

Параметры режимов орошения и удобрения

Параметры	Режим 1 (Традиционный)	Режим 2	Режим 3	Режим 4 (Инновационный)
Тип орошения	Дождевание	Капельное (базовое)	Капельное (импульсное)	Капельное (умное с датчиками влажности)
Норма расхода воды, м³/га	4500	2800	2200	1800
Внесение биоудобрений, кг/га	0	150	250	350 (через фертигацию)
Частота полива	Раз в 5 дней	Раз в 3 дня	Ежедневно	Автоматически (по датчикам)

Ввиду высокой стоимости дизельного топлива и нестабильности электросетей в сельской местности Сенегала, в качестве основного источника

энергии для насосных станций применялись автономные солнечные фотоэлектрические установки мощностью 1500 Вт. Это решение не только снизило эксплуатационные расходы, но и обеспечило снижение углеродного следа. Работы проводились с использованием гибридных засухоустойчивых сортов арахиса, специально адаптированных селекционерами для данного региона.



Рис. 3. Микроуровень «умной» фертигации и датчиков корневой зоны (Режим 4)

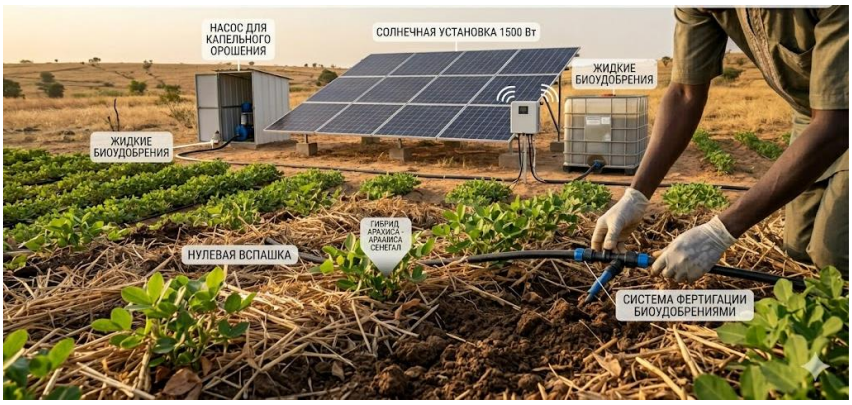


Рис. 4. Сохранение почв (No-Till) и применение биоудобрений через фертигацию

Результаты испытаний и оценка урожайности

Оценка эффективности применяемых методов проводилась путем взвешивания собранного урожая, анализа качества плодов и расчета рентабельности. Особое внимание уделялось показателю эффективности использования воды (ЭИВ). Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты оценки урожайности и эффективности водопотребления

Показатель	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
Урожайность арахиса, т/га	1,2	1,8	2,4	3,1
Эффективность использования воды (ЭИВ), кг/м³	0,27	0,64	1,09	1,72

По результатам анализа данных, представленных в таблице 4, отмечается, что наибольшие показатели урожайности и эффективности использования воды характерны для участков, обрабатываемых при режиме 4. Что касается режима 1, то здесь наблюдается нерациональный расход водных ресурсов и низкая урожайность из-за пересыхания верхнего слоя почвы между поливами и неравномерного распределения влаги.

Из полученных данных следует, что наибольшая стабильность и рентабельность сельскохозяйственного производства в условиях Сенегала достигается при использовании режимов 3 и 4. Использование датчиков влажности в режиме 4 позволило исключить переувлажнение почвы и вымывание питательных веществ в более глубокие слои, недоступные для корневой системы растений.

Экономическая эффективность и перспективы масштабирования

Внедрение «умного» капельного орошения (Режим 4) потребовало первоначальных капитальных вложений на 45% выше по сравнению с традиционными методами, в основном из-за закупки солнечных панелей, контроллеров и системы трубок. Однако расчеты показали, что окупаемость таких систем составляет от 1,5 до 2 лет благодаря снижению расходов на воду, удобрения (до 30% экономии за счет точной фертигации) и увеличению урожайности более чем в 2,5 раза.

Масштабирование данного опыта на другие регионы Сенегала способно кардинально изменить экономический ландшафт АПК страны, создавая новые рабочие места в сфере обслуживания высокотехнологичного оборудования и обеспечивая продовольственную независимость.



Рис. 5. Визуализация экономического успеха и масштабирования «умных» рашений

Обобщая полученные результаты исследования эффективности различных агротехнологий, следует оптимальным признать режим 4: капельное орошение, управляемое датчиками влажности; фертигация жидкими биоудобрениями в объеме 350 кг/га; автоматическая подача воды; использование насосов на солнечной энергии. Интеграция данных технологий

представляет собой мощный инструмент для адаптации сельского хозяйства Африки к глобальным климатическим вызовам.

Список литературы

1. Устойчивое развитие сельского хозяйства в странах Тропической Африки / Под ред. А.В. Иванова. – М.: Агропромиздат, 2022. – 245 с.
2. Ндиайе М., Си Ф. Инновационные системы ирригации в условиях Сахеля // Вестник аграрных технологий. 2023. № 4. С. 12–18.
3. Эффективность применения биоудобрений при выращивании арахиса на деградированных почвах / С.А. Смирнов, Ж. Диоп, В.В. Козлов // Международный сельскохозяйственный журнал. 2024. № 2. С. 55–61.
4. Использование солнечной энергии в водоснабжении сельскохозяйственных угодий / К.Л. Бадаев // Альтернативная энергетика и экология. 2024. № 8. С. 89–94.
5. Свалова М. В. и др. Исследование солнечной энергии как одного из возобновляемых источников энергии, возможных к применению в сельском хозяйстве // АПК России. 2022.
6. Моделирование экономических процессов в аграрном секторе Западной Африки / П.Р. Васильев // Экономика сельского хозяйства России. 2025. № 1. С. 34–40.

Левина Т.А.
к.э.н., заведующий кафедрой «Стандартизации, метрологии и сертификации»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Gta03@mail.ru
Клочкова Д.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Ddasha2017@yandex.ru
Клочков Я.М.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
gluhihyak@gmail.com
Носкова В.Е.
ассистент Центра проектной деятельности
Московский политехнический университет
Россия, Москва
pond5084@gmail.com

КОНЦЕПЦИЯ ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕКУЩЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ

Аннотация. Предложена концепция бортовой системы непрерывного контроля и измерения текущей безотказности наиболее нагруженных деталей сельскохозяйственных

тракторов в процессе эксплуатации. Система, обозначенная как СКИН, реализует принцип обслуживания техники по фактическому состоянию и интегрируется в существующую бортовую сеть машины. Рассмотрены её назначение, обобщённая структурная схема и алгоритм функционирования, включающий первичное преобразование деформации деталей под нагрузкой в электрический сигнал, его последующую обработку бортовым вычислителем и визуализацию текущего уровня безотказности на индикаторе оператора. Предусмотрено непрерывное сравнение измеренных значений с нормативными показателями и оповещение оператора о достижении опасных или критических уровней по принципу «светофора». Показано, что внедрение системы СКИН позволит перейти от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактической потребности, сократить время внеплановых простоев техники и повысить экономическую эффективность эксплуатации машинно-тракторного парка. Определены основные научно-технические задачи, требующие решения для практической реализации предложенной концепции.

Ключевые слова: безотказность; сельскохозяйственный трактор; бортовая система; контроль по фактическому состоянию; техническое обслуживание; цифровизация.

Levina T.A.
Candidate of Economic Sciences, Head of the Department
of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Gta03@mail.ru
Klochkova D.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Ddasha2017@yandex.ru
Klochkov Ya.M.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
gluhihyak@gmail.com
Noskova V.E.
Assistant *at the* Project Activity Center
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
pond5084@gmail.com

CONCEPT OF AN ON-BOARD SYSTEM FOR MONITORING THE CURRENT FAILURE-FREE OPERATION OF AGRICULTURAL TRACTOR PARTS

Abstract. The concept of an on-board system for continuous monitoring and measurement of the current failure-free operation of the most loaded parts of agricultural tractors during operation is proposed. The system, designated as СКИН, implements the principle of condition-based maintenance and is integrated into the existing on-board network of the machine. Its purpose, generalized structural scheme, and functioning algorithm are considered, including the primary conversion of the deformation of parts under load into an electrical signal, its subsequent processing by an on-board computer, and the visualization of the current level of failure-free operation on the operator's display. Continuous comparison of the measured values

with standard indicators and notification of the operator when dangerous or critical levels are reached according to the «traffic light» principle is provided. It is shown that the implementation of the СКИН system will make it possible to move from scheduled preventive maintenance to maintenance based on actual need, reduce the time of unscheduled downtime of equipment, and increase the economic efficiency of operating the machine and tractor fleet. The main scientific and technical tasks that need to be solved for the practical implementation of the proposed concept are identified.

Keywords: failure-free operation; agricultural tractor; on-board system; condition-based monitoring; maintenance; digitalization.

Повышение эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники является одной из наиболее актуальных задач современного агропромышленного комплекса. Как было показано в предыдущих работах, действующая планово-предупредительная система технического обслуживания и ремонта (ТОР) не позволяет в полной мере предотвратить внезапные отказы, возникающие между регламентными воздействиями [1, 2]. При этом нормативная база, заложенная ещё в ГОСТ 24925-81, предусматривает внедрение встроенных средств диагностирования, однако до настоящего времени соответствующие технические решения на серийных отечественных тракторах отсутствуют [3].

Мировой опыт свидетельствует о том, что наиболее эффективным направлением является переход к обслуживанию по фактическому состоянию, основанному на непрерывном мониторинге параметров, определяющих работоспособность узлов и агрегатов [4]. Реализация такого подхода требует создания специализированных бортовых систем, способных в режиме реального времени оценивать текущий уровень безотказности деталей и предоставлять оператору объективную информацию для принятия решений о дальнейшей эксплуатации, ремонте или замене контролируемых элементов [5].

Современные тенденции цифровизации сельского хозяйства открывают новые возможности для создания интеллектуальных систем управления техническим состоянием машин [6]. Внедрение методов предиктивной аналитики, основанных на алгоритмах машинного обучения и обработке больших массивов данных, позволяет прогнозировать развитие деградационных процессов в узлах и агрегатах [7]. Однако для эффективной работы таких алгоритмов требуется первичная информация, поступающая непосредственно от датчиков, установленных на контролируемых деталях. Опыт, накопленный авторами в области контроля дефектов полупроводниковых структур и сенсорных компонентов [8–10], может быть использован при разработке измерительных каналов системы.

Целью настоящей работы является разработка и обоснование концепции встроенной системы контроля текущей безотказности деталей сельскохозяйственных тракторов, предназначенной для непрерывного измерения, обработки и визуализации показателей надёжности непосредственно в процессе выполнения полевых работ.

Объектом исследования является процесс контроля технического состояния сельскохозяйственных тракторов в условиях рядовой эксплуатации. В качестве базового прототипа для интеграции разрабатываемой системы выбран гусеничный трактор ДТ-75, как одна из наиболее массовых и длительно эксплуатируемых машин в Российской Федерации.

Методологической основой разработки послужили принципы системного подхода, теории надёжности и технической диагностики, изложенные в фундаментальных трудах [11, 12]. Концепция системы формировалась исходя из необходимости обеспечения непрерывного контроля безотказности деталей, лимитирующих надёжность машины в целом. При этом учитывались требования к простоте интеграции в существующую бортовую сеть, минимальному вмешательству в конструкцию базового трактора и интуитивной понятности интерфейса для оператора.

Разрабатываемая система контроля и измерения надежности (СКИН) представляет собой бортовое электронное устройство, встраиваемое в штатную систему управления трактором. Её основная функция заключается в непрерывном измерении текущей безотказности деталей, наиболее часто выходящих из строя, и визуальном отображении полученных значений на индикаторе в кабине оператора.

Контролю подлежат детали, определяющие безотказность ходовой части, навесной системы и других агрегатов, отказы которых, по статистическим данным, приводят к наиболее продолжительным простоям техники [2]. Текущие значения безотказности деталей и надёжности контролируемых узлов рассматриваются как контролируемые параметры, а сами детали и узлы – как объекты контроля.

Конструкция системы предполагает деление на две функциональные сборки. Первая размещается непосредственно на контролируемых агрегатах и включает датчики деформации с устройствами усиления и аналого-цифрового преобразования сигналов. Вторая сборка встраивается в бортовую контрольно-управляющую систему трактора и содержит микропроцессорный вычислитель, компаратор для сравнения текущих значений с нормативами, а также средства индикации. Связь между сборками осуществляется по цифровой шине данных [13].

Функционирование системы СКИН основано на регистрации деформаций, возникающих в рабочих сечениях контролируемых деталей под действием эксплуатационных нагрузок. Для этого на поверхность каждой контролируемой детали устанавливается датчик, преобразующий механическую деформацию в электрический сигнал, пропорциональный действующему напряжению. Как показано в работе [14], применение мостовых схем включения тензорезисторов позволяет обеспечить требуемую точность измерения деформаций в широком диапазоне нагрузок.

В процессе работы трактора сигналы от датчиков поступают в блок обработки, где они усиливаются, преобразуются в цифровую форму и затем

интерпретируются в значения текущей безотказности. Калибровка измерительных каналов выполняется предварительно, в лабораторных условиях, на основании испытаний эталонных деталей, прошедших контроль на отсутствие недопустимых внутренних дефектов [15]. Это позволяет установить однозначную функциональную связь между величиной выходного сигнала датчика и вероятностью безотказной работы детали в заданном интервале нагрузок.

Обработка информации и интерфейс оператора

Обработка оцифрованных сигналов осуществляется микропроцессорным вычислителем, в памяти которого хранятся нормативные значения безотказности для каждой контролируемой детали. В процессе работы система непрерывно сравнивает текущие фактические значения с нормативами и вычисляет величину отклонения. На основании этих отклонений формируется интегральная оценка надёжности контролируемого узла или агрегата.

Результаты контроля отображаются на жидкокристаллическом индикаторе, установленном в кабине трактора. Для наглядности восприятия информации используется принцип «светофора» с тремя цветовыми зонами:

- зелёная зона (текущая безотказность находится в допустимых пределах) – деталь исправна, эксплуатация разрешена;
- жёлтая зона (безотказность приближается к критическому уровню) – требуется повышенное внимание, рекомендовано планирование замены детали в ближайшее время;
- красная зона (безотказность ниже допустимого предела) – эксплуатация сопряжена с высоким риском внезапного отказа, необходима немедленная остановка и замена детали.

Такой интерфейс не требует от оператора специальных знаний в области надёжности и позволяет быстро оценить техническое состояние машины в целом.

Преимущества и ожидаемые эффекты

Предложенная концепция системы СКИН обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным допусковым контролем. Во-первых, она позволяет выявлять предотказные состояния задолго до того, как деградационные процессы приведут к разрушению детали. Во-вторых, система обеспечивает объективную количественную оценку текущего уровня безотказности, а не только бинарное заключение «годен/не годен». В-третьих, интеграция в существующую бортовую сеть трактора не требует кардинального изменения его конструкции.

Ожидаемыми практическими результатами внедрения системы СКИН являются:

- переход от обслуживания по жёсткому регламенту к обслуживанию по фактической потребности, определяемой реальным техническим состоянием;

• сокращение времени внеплановых простоев техники за счёт своевременного предупреждения об отказах;

• повышение коэффициента технической готовности машинно-тракторного парка;

• снижение затрат на ремонт и запасные части благодаря исключению преждевременной замены ещё работоспособных деталей.

Как показывает опыт внедрения аналогичных систем в смежных отраслях, экономический эффект от перехода к обслуживанию по фактическому состоянию может достигать 15–25% от общих затрат на ТОР [16].

Задачи для дальнейшей разработки

Для практической реализации предложенной концепции необходимо решить комплекс научно-технических задач, включающий:

• разработку методики калибровки измерительных каналов для деталей различных типоразмеров;

• создание алгоритмов преобразования электрических сигналов в вероятностные показатели безотказности с учётом конструктивно-технологических параметров деталей;

• обеспечение помехоустойчивости и надёжности передачи данных от датчиков к вычислителю в условиях вибраций и электромагнитных помех, характерных для сельскохозяйственных тракторов;

• проведение экспериментальных исследований для подтверждения работоспособности системы на реальных объектах.

Решение перечисленных задач позволит перейти от концептуальной проработки к созданию опытного образца системы СКИН и его последующему внедрению в производство.

Выводы

1. Разработана концепция встроенной бортовой системы контроля текущей безотказности деталей сельскохозяйственных тракторов, реализующей принцип обслуживания по фактическому состоянию.

2. Предложен обобщённый алгоритм функционирования системы, включающий непрерывное измерение деформаций деталей, преобразование сигналов в показатели безотказности, их сравнение с нормативами и визуализацию результатов по трёхуровневому принципу «светофора».

3. Показано, что внедрение системы СКИН позволит сократить внеплановые простои техники, повысить коэффициент технической готовности и снизить эксплуатационные затраты.

4. Определены первоочередные задачи, требующие решения для практической реализации предложенной концепции.

Список литературы

1. Никитченко С.Л., Воронов Е.В. Причинные факторы снижения эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники // Современные проблемы науки и образования. – 2024. – № 4. – С. 15–22.

2. Габитов И.И., Фаюршин А.Ф., Иофинов П.А., Зайнуллин Р.Х. Обеспечение эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники с учётом региональных особенностей системы технического обслуживания и ремонта // Чтения академика В.Н. Болтинского: сборник статей. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 45–53.

3. ГОСТ 24925-81. Техническая диагностика. Тракторы. Приспособленность к диагностированию. Общие технические требования. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 20 с.

4. Shinde K. Prognostic Framework for Failure Analysis and Smart Farming // SAE Technical Paper 2025-28-0340. – 2025. – 3 p.

5. Карпиевич Ю.Д. Бортовой мониторинг технического состояния сцепления тракторов «Беларус» // Вестник БНТУ. – 2021. – № 2. – С. 34–41.

6. Management of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Digital Technologies // Russian Agricultural Sciences. – 2025. – Vol. 50, No. 6. – P. 786–791.

7. Цифровые технологии в обеспечении надёжности сельскохозяйственной техники: Материалы Международной научно-технической конференции. – М.: ФНАЦ ВИМ, 2023. – 320 с.

8. Левина Т.А., Шемякин А.В., Клочков Я.М., Адылина А.П., Кудряшова Д.А. Надёжность электронных систем, обеспечивающих нейронные связи искусственного интеллекта в сельскохозяйственном машиностроении // Вестник РГАТУ. – 2024. – Т.16, №3. – С. 141–150.

9. Клочков А.Я., Чернявский А.И., Клочков Я.М., Кудряшова Д.А. Совершенствование технологии и средств контроля сенсорных компонентов сельскохозяйственной техники // СМиС-2024. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2024. – С. 420–428.

10. Клочков А.Я., Клочкова Д.А., Клочков Я.М., Юдаев С.Н. Нестационарные фотоемкостные методы оценки электронных элементов автоматики // СМиС-2025. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2025. – С. 71–75.

11. ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 2017-01-01. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.

12. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сварка алюминиевых сплавов (монография). 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Руда и металлы, 2020. – 476 с.

13. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 2016-06-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 15 с.

14. Клочков А.Я., Морозов А.С., Честных А.Р., Клочков Я.М., Кудряшова Д.А. Стандартизация и пути повышения надёжности полупроводниковой элементной базы машиностроения // СМиС-2024. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2024. – С. 36–41.

15. Клочков А.Я., Клочкова Д.А., Клочков Я.М., Левина Т.А. Аттестация электронных дефектов материала нейросетевых устройств сельхозтехники // СМиС-2025. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2025. – С. 523–529.

16. ISO 13374-1:2003. Condition monitoring and diagnostics of machines – Data processing, communication and presentation – Part 1: General guidelines. – Geneva: ISO, 2003. – 22 p.

Абрамов Ю.Н.
к.т.н., доцент кафедры ЭМТП
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
university@rgatu.ru
Жирков Е.А.
преподаватель ФДП и СПО кафедры ЭМТП
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
evgenii030780@mail.ru
Угланов М.Б.
д.т.н., профессор кафедры «ЭМТП»
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
university@rgatu.ru

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ БОТВОУДАЛИТЕЛЬ КАРТОФЕЛЕУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Аннотация. Модернизируемый рабочий орган, состоящий из ряда пальцев, закрепленных шарнирно на оси, которые совместно с теребящим валиком удаляют растительные остатки из машины, а часть мелких растительных включений удаляется горкой раската. Сепарируемая масса поступает к рабочему органу по прутковому элеватору.

Цель работы – улучшение процесса удаления ботвы из клубненосного пласта, повышение качества отделения клубней от почвы и измельчение растительных остатков с последующей сепарацией.

Поставленная цель достигается тем, что модернизированный ботвоудалитель картофелекопателя обеспечивает возможность работы в различных почвенно-климатических условиях, хорошее отделение ботвы из клубненосного пласта, что в конечном итоге позволит повысить качество отделения клубней от почвы и измельчение растительных остатков.

Ключевые слова: ботвоудалитель, горка раската, прутковый элеватор, сепарация, процесса удаления ботвы, измельчение.

Abramov Yu.N.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the EMTP Department
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
university@rgatu.ru
Zhirkov E.A.
Lecturer of the FDP and SPO of the EMTP Department
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
evgenii030780@mail.ru
Uglanov M.B.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the EMTP Department
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
university@rgatu.ru

UPGRADED POTATO HARVESTER TOPPER

Abstract. An upgraded working body consisting of a number of fingers pivotally fixed on an axis, which, together with a pulling roller, remove plant residues from the machine, and some of the small plant inclusions are removed by a rolling slide. The separated mass is supplied to the working body via a bar elevator.

The aim of the work is to improve the process of removing tops from the tuberous layer, improve the quality of separation of tubers from the soil and crushing of plant residues with subsequent separation.

This goal is achieved by the fact that the upgraded potato dredger provides the ability to work in various soil and climatic conditions, good separation of the tops from the tuberous layer, which ultimately will improve the quality of separation of tubers from the soil and crushing of plant residues.

Keywords: topper, rolling slide, rod elevator, separation, topping removal process, crushing.

Повышение урожайности картофеля достигается внедрением интенсивной технологии возделывания и уборки, а также повышением уровня механизации за счет модернизации отдельных узлов и механизмов в картофелеуборочных комбайнах.

Одной из трудоемких процессов возделывания картофеля является уборка. На неё приходится около 70% общих затрат труда. В настоящее время как за рубежом, так и в России, производятся и применяются комбинированные комплексы машин для возделывания и уборки картофеля, которые минимизируют затраты труда и повышают производительность.

Цель данной статьи – совершенствование процесса уборки картофеля с модернизацией ботвоудалителя картофелеуборочного комбайна, что позволит создать высокопроизводительный машинно-тракторный агрегат, повысить его производительность.

У экспериментального картофелеуборочного комбайна во время работы наблюдается забивание ботвоудалителя растительными остатками (недостаточное качество по удалению растительных остатков), поэтому данная статья, направленная на совершенствование технологии уборки с модернизацией ботвоудалителя картофелеуборочного комбайна, является актуальной. Модернизированный картофелеуборочный комбайн является более производительным, ворох менее засорен растительными и почвенными примесями, что позволяет сократить повреждения клубней за счет отказа от дополнительной доработки вороха перед закладкой на хранение.

У некоторых сортов картофеля клубни прочно прикреплены к ботве, поэтому разработка устройств и способов удаления ботвы в процессе уборки имеет важное значение. В современных комбайнах процесс ботвоотделения и удаления осуществляется ботвоотделяющими аппаратами, которые подразделяются на следующие основные типы.

Существующие элеватор и клубнеотделяющий валик, которые используется в основном на картофелеуборочных комбайнах имеют следующий

недостаток. При работе картофелеуборочного комбайна длинная ботва часто наматывается на валик.

В следующем известном транспортере – ботвоудалителе клубни, не отделившиеся от ботвы, зависают на планке под полотном транспортера.

Из анализа различных конструкций ботвоудаляющих устройств, нашедших применение, в настоящее время на картофелеуборочных машинах наиболее выгодным представляется комбинированный рабочий орган грабельно-пальчатого типа с теребящим валиком и работающая с ним последовательно противоточная пальчиковая горка (Рис.).

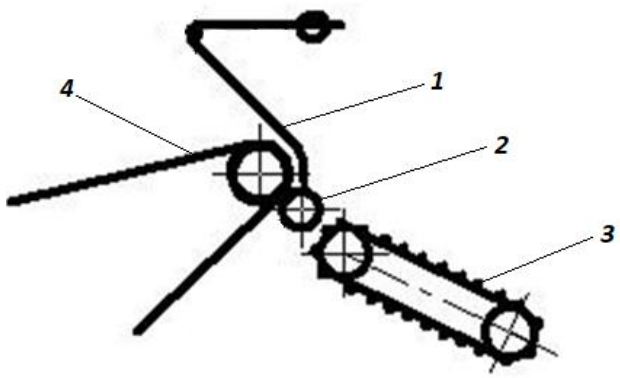


Рис. Схема рабочего органа:
1 – палец; 2 – валик; 3 – горка; 4 – прутковый элеватор

Модернизируемый рабочий орган состоит из рада пальцев 1, закрепленных шарнирно на оси, которые совместно с теребящим валиком 2 удаляют растительные остатки из машины, а часть мелких растительных включений удаляется горкой 3. Сепарируемая масса поступает к рабочему органу по прутковому элеватору 4.

Данный ботвоудалитель имеет ряд преимуществ по отношению с ботвоудоляющим устройством транспортерного типа:

1. менее энергоёмок;
2. имеется возможность регулировки параметров;
3. потери и повреждение клубней практически сведены к нулю.

Однако в процессе эксплуатации были замечены некоторые недостатки:

1. ныне существующая конструкция пальцевой гребенки не позволяет регулировать расстояние между ними;

2. металлический теребящий валик залипает почвой и на него наматываются растительные остатки.

Эти недостатки в ходе теоретического исследования были устранены за счет изменения конструкции пальцев и способов их крепления на шарнирной оси, установки скатной доски и замены металлического валика на валик с резиновым покрытием.

Сравнительные показатели представлены в таблице.

Таблица

Технико-экономические показатели

Показатели	Ед. измерения	Базовый комбайн	Модернизированный комбайн
Агрегатируется	-	МТЗ-80 (82)	МТЗ-80 (82)
Рабочая скорость	км/ч	4–10	5–12
Ширина захвата	м	1,4	1,4
Производительность за 1 ч:	га/ч		
- основной работы		0,8	0,9
- сменного времени		0,7	0,76
- эксплуатационного времени		0,64	0,74
5.Количество обслуживающего персонала	чел.	5	3
- тракторист		1	1
- рабочий		4	2
6. Расход ГСМ	кг	30,0	29,2
7. Годовая занятость:	ч		
- комбайн		200	200
- трактор		1410	1410
8. Норма амортизационных отчислений:	%		
- комбайн		12,5	12,5
- трактор		9,2	9,2

Таким образом, предлагаемая модернизация ботвоудалителя картофелеуборочного комбайна позволила создать высокопроизводительный машинно-тракторный агрегат. Эти показатели немаловажны в условиях Нечерноземной зоны РФ, где преобладают поля сложной конфигурации и часто отсутствуют хорошие подъездные пути.

Исходя из существующих способов выкапывания клубней и дополнительных операций по уборке картофеля, ориентируясь на применение прогрессивных и наиболее эффективных из них, предлагаем следующие методы проведения работ: для скашивания ботвы предлагается использовать агрегат МТЗ-80 (82) + БД-4М.

Список литературы

1. Особенности уборки картофеля / М. Н. Калимуллин, Д. М. Исмагилов, Р. Р. Багаутдинов, М. З. Салимзянов // Проблемы развития малого и среднего бизнеса на селе в условиях цифровой трансформации экономик: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Казанского ГАУ, Казань, 24–25 марта 2022 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. – С. 156–162. – EDN UTIANI.

2. Лабораторно-полевые исследования модернизированной ботвоуборочной машины БД-4М Угланов М.Б., Иванкина О.П., Попов А.С., Бышов Д.Н., Абрамов Ю.Н. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 78. С. 403–412.

3. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна / И. А. Успенский, Г. К. Рембалович, М. Ю. Костенко, Р. В. Безносюк // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2018. – № 1(49). – С. 262–269. – DOI 10.32786/2071-9485-2018-01-262-269. – EDN YZKHBJ.

4. Методика настройки картофелеуборочного комбайна / М. Ю. Костенко, А. Н. Шапошников, Н. А. Костенко, И. Н. Горячкина // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 11. – С. 45-48. – EDN NDGPQL.

5. Новая сельскохозяйственная техника за рубежом (По материалам Международной выставки «Agritechnika-2007», Ганновер): Науч. ан. обзор.- М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 132 с.

6. Исследование влияния колебаний рабочих элементов на качество работы ботвоизмельчителя [Текст] / М.Н. Калимуллин, Р.К. Абдрахманов //Техника и оборудование для села. – 2015. – № 5– С. 35 – 37.

7. Совершенствование технологии возделывания и уборки картофеля в условиях Рязанской области / К. Н. Дрожжин, Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, Г. К. Рембалович // Сборник научных трудов преподавателей и аспирантов рязанского государственного агротехнологического университета: Материалы науч.-практ. конф., Рязань, 20–21 марта 2011 года. – Рязань, 2011. – С. 107–109.

8. Машины для удаления ботвы корнеклубнеплодов (конструкция, теория, расчет, эксплуатация) [Текст] /М.Н. Калимуллин, Р.К. Абдрахманов. – Казань: Изд-во Казанского государственного аграрного университета, 2015. – 164 с.

9. Optimization of the energy consumption of the shredder of the tops for the sustainable development of agriculture / Y. N. Abramov, S. N. Borychev, M. Y. Kostenko [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volgograd, 12–14 мая 2021 года. – Volgograd, 2022. – P. 012001. – DOI 10.1088/1755-1315/965/1/012001. – EDN KJKJNL.

10. Improvement of the working bodies of the harvesting machines by means of the use of composite materials / N. Zhbanov, N. Byshow, N. Kostenko [et al.] // Bio web of conferences: International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources» (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2020. – P. 00191. – DOI 10.1051/bioconf/20201700191. – EDN TTPXWR.

Латыпова Э.Х.
к.б.н., старший преподаватель кафедры технологии мясных, молочных продуктов и химии
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ
Россия, Уфа
g1311@mail.ru
Минибаева И.И.
студент
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ
Россия, Уфа
g1311@mail.ru
Кузнецов Н.А.
студент
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ
Россия, Уфа
g1311@mail.ru

ОБЗОР МИРОВЫХ ПРАКТИК СЕРТИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В РОССИИ

Аннотация. В статье представлен анализ международных систем сертификации органической молочной продукции (EU Organic, USDA Organic, JAS, Bio Suisse и др.) и их ключевых требований: запрет на использование синтетических веществ, требования к кормовой базе, условиям содержания животных, прослеживаемости и маркировке. Цель исследования – провести анализ и сопоставление международных систем сертификации органической молочной продукции, определить возможности их адаптации к российским реалиям. Рассмотрена российская нормативная база в области органического производства (Федеральный закон № 280-ФЗ, ГОСТ Р 56508–2015), выявлены основные барьеры, препятствующие широкому внедрению органической сертификации в сегменте цельномолочных продуктов: высокая стоимость подтверждения соответствия, ограниченное количество аккредитованных органов, недостаточная информированность производителей и потребителей. Определены перспективные направления развития: гармонизация российских стандартов с международными, развитие инфраструктуры органического животноводства, государственная поддержка перехода хозяйств на органическое производство. Сделан вывод о том, что внедрение органической сертификации открывает для российских производителей молочной продукции возможности экспорта и работы в премиальном сегменте внутреннего рынка. Выводы подчёркивают высокий потенциал России в области органического молочного производства. Его реализация возможна при дальнейшей гармонизации национальных стандартов с международными нормами, усилении государственной поддержки и развитии инфраструктуры/

Ключевые слова: органическая продукция, органическое молоко, сертификация, молочное животноводство, органическое сельское хозяйство, международные стандарты, рынок органических продуктов.

Latypova E.Kh.
Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer of the Department of Meat and Dairy Product Technology and Chemistry
BashSAU
Russia, Ufa
g1311@mail.ru
Minibaeva I.I.
Student
BashSAU
Russia, Ufa
g1311@mail.ru
Kuznetsov N.A.
Student
BashSAU
Russia, Ufa
g1311@mail.ru

OVERVIEW OF GLOBAL ORGANIC DAIRY CERTIFICATION PRACTICES AND PROSPECTS FOR IMPLEMENTATION IN RUSSIA

Abstract. The article presents an analysis of international certification systems for organic dairy products (EU Organic, USDA Organic, JAS, Bio Suisse, etc.) and their key requirements: a ban on the use of synthetic substances, requirements for food supply, animal conditions, traceability and labeling. The purpose of the study is to analyze and compare international certification systems for organic dairy products, to determine the possibilities of their adaptation to Russian realities. The Russian regulatory framework in the field of organic production was considered (Federal Law No. 280-FZ, GOST R 56508-2015), the main barriers preventing the widespread introduction of organic certification in the segment of whole milk products were identified: the high cost of confirming compliance, a limited number of accredited bodies, and insufficient awareness of manufacturers and consumers. Promising areas of development have been identified: harmonization of Russian standards with international ones, development of organic livestock infrastructure, state support for the transition of farms to organic production. It was concluded that the introduction of organic certification opens up export and work opportunities for Russian dairy producers in the premium segment of the domestic market. The conclusions emphasize the high potential of Russia in the field of organic dairy production. Its implementation is possible with further harmonization of national standards with international standards, increased state support and infrastructure development.

Keywords: artificial intelligence, metrological accounting, measuring instruments, machine learning, calibration, verification, automation, metrological service.

Мировой рынок органической молочной продукции за последние десятилетия демонстрирует устойчивый рост, что во многом связано с усилением внимания потребителей к вопросам здоровья, экологической устойчивости и прозрачности происхождения продуктов питания. Органическая сертификация выступает ключевым инструментом подтверждения того, что молочная продукция произведена в соответствии с установленными экологическими стандартами, исключающими использование синтетических удобрений, пестицидов, гормонов роста и профилактических антибиотиков. По данным Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), объем мирового

рынка органических молочных продуктов в 2024 г. превысил 25 млрд евро, при этом лидирующие позиции занимают страны Европейского союза, США и Канада. В России сектор органического животноводства находится на этапе становления: по состоянию на 2025 г. доля органических молочных продуктов в общем объеме молочного рынка не превышает 0,3%, тогда как в странах ЕС этот показатель достигает 5–8%. Одним из ключевых факторов, сдерживающих развитие, является недостаточная адаптация российских производителей к требованиям международной и национальной органической сертификации [3].

Цель работы – провести обзор мировых практик сертификации органических молочных продуктов, сопоставить их с российской нормативной базой и определить перспективы внедрения органического производства в отечественную молочную отрасль.

Материалы и методы исследования. Методология исследования включает анализ нормативно-правовой базы, систематизацию опыта ведущих стран в области сертификации органической продукции, сравнительный анализ стандартов EU Organic, USDA Organic, JAS и других систем, а также оценку текущего состояния органического молочного производства в России.

Сертификация органической продукции в мире базируется на принципах, закрепленных в руководствах Международной федерации органического сельскохозяйственного движения (IFOAM). На их основе сформировались региональные и национальные системы, имеющие как общие черты, так и специфические требования.

Европейский союз (EU Organic). Наиболее прогрессивной системой органической сертификации признаётся модель, принятая в Европейском союзе. Регламент ЕС 2018/848 определяет единые стандарты для производства и маркировки органической продукции. Данный нормативный документ вступил в действие в 2022 году, сменив собой предыдущие акты, регулировавшие органическое сельское хозяйство. Процедуру сертификации проводят аккредитованные инспекционные организации, осуществляющие регулярные проверки фермерских хозяйств, перерабатывающих мощностей и всей логистической цепи. Особое значение придаётся использованию только органических кормов для животных, выполнению норм по площади выпаса и строгому запрету на применение генетически модифицированных организмов. [4].

Соединенные Штаты Америки (USDA Organic). Национальная органическая программа (NOP) Министерства сельского хозяйства США во многом близка к европейским требованиям, но имеет особенности. Законодательной основой является Organic Foods Production Act, принятый в 1990 году. Национальная органическая программа устанавливает единые стандарты для производства, переработки и маркировки органических продуктов. По данным USDA, объем рынка органических продуктов питания в

США в 2023 году превысил 67 миллиардов долларов, при этом значительную часть составляет молочная продукция, включая молоко, сыр, йогурты и масло. Сертификация осуществляется независимыми сертификационными агентствами, аккредитованными Министерством сельского хозяйства. Фермы обязаны соблюдать строгие требования к содержанию животных, включая обязательный доступ коров к пастбищам в течение значительной части года, запрет на использование гормона роста rBST и обязательное использование органических кормов

Японский стандарт JAS (Japan Agricultural Standard). Органическая сертификация в Японии ориентирована на строгий контроль происхождения кормов и отсутствие ГМО. Для молочных продуктов обязательно указание места происхождения молока, а также соблюдение норм благополучия животных, сопоставимых с EU Organic.

В Европе и США действуют также добровольные сертификации, предъявляющие более высокие требования, чем государственные стандарты. Важным примером эффективной системы органической сертификации является Швейцария, где значительную роль играет частная ассоциация Bio Suisse. Ее стандарты считаются одними из самых строгих в мире. Bio Suisse требует, чтобы не менее 90% кормов производилось на собственном хозяйстве, а поголовье скота было жестко привязано к площади пастбищ. Demeter (биодинамическое земледелие) добавляет требования к использованию биодинамических препаратов и особому режиму севооборота.

Анализ зарубежного опыта позволяет выделить общие элементы мировых систем сертификации органических молочных продуктов. Прежде всего это обязательная сертификация всей производственной цепочки. Проверке подлежат не только фермы, но и предприятия переработки, транспортировки и хранения. Вторым важным элементом является прослеживаемость продукции, позволяющая установить происхождение каждой партии молока. Третьим принципом выступает регулярный независимый аудит, который проводится ежегодно, а в ряде случаев сопровождается внеплановыми инспекциями. Кроме того, широко применяются системы маркировки, позволяющие потребителям легко идентифицировать органическую продукцию на рынке. В Европейском союзе используется единый знак EU Organic Leaf, в США применяется маркировка USDA Organic [6].

Отечественный опыт сертификации органических молочных продуктов. В России основой регулирования является Федеральный закон от 03.08.2018 № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Закон устанавливает: порядок сертификации, требования к производству органической продукции, обязательное наличие единого знака органической продукции. Так же закон предусматривает переходный период для животноводства – 12 месяцев. Федеральный закон во многом согласован с международными нормами и отражает рекомендации IFOAM (Международная федерация движе-

ний за органическое сельское хозяйство). Предприятия, успешно прошедшие сертификацию, могут размещать на продукции специальный государственный знак, подтверждающий её органическое происхождение.

Законодательство закрепило ключевые термины органического производства, определило требования к маркировке и создало государственный реестр производителей органической продукции. По информации Минсельхоза России, к 2024 году в реестре зарегистрировано свыше 200 сертифицированных компаний, однако доля органической молочной продукции на рынке пока остаётся незначительной. [1].

Дополнительно действует ГОСТ Р 56508–2015 «Продукция органического производства. Правила производства, хранения, транспортирования», который детализирует требования к животноводству: площадь выгула, состав кормов, ветеринарные мероприятия.

Несмотря на наличие законодательной базы, развитие органического молочного производства в России сталкивается с рядом ограничений. Одной из ключевых проблем является высокая стоимость сертификации и переходного периода, который может длиться до трех лет. В течение этого времени ферма должна соблюдать все требования органического производства, но не имеет права маркировать продукцию как органическую. Стоимость сертификации одного хозяйства (включая переходный период) составляет от 300 до 700 тыс. рублей в год. При этом себестоимость органического молока на 30–50% выше традиционного из-за более низкой продуктивности животных и затрат на корма. Отсутствие массового платежеспособного спроса делает органическую продукцию нишевой

Дополнительным фактором является недостаточно развитая инфраструктура переработки и логистики, необходимая для сохранения органического статуса продукции на всех этапах [6].

Усложняет процесс сертификации в России ограниченное количество аккредитованных органов по сертификации органической продукции. На 2025 г. в стране действует 14 организаций. Многие производители не знакомы с требованиями органического законодательства, а потребители не различают органическую продукцию и продукцию «без химии» или «экологически чистую», что снижает ценность сертификации.

Перспективы внедрения и развития систем сертификации органической молочной продукции в России во многом зависят от дальнейшей унификации отечественных стандартов с мировыми нормами. Это имеет особое значение для расширения экспортных возможностей российской органики. Рынки Европы и Азии предъявляют строгие требования к подтверждению органического статуса, поэтому признание единых стандартов и процедур сертификации способно значительно упростить выход российских производителей на зарубежные рынки [7].

Дополнительным фактором развития может стать государственная поддержка производителей, переходящих на органические методы ведения

сельского хозяйства. В ряде регионов уже действуют программы субсидирования затрат на сертификацию и развитие органического производства. Расширение таких программ, а также развитие научных исследований в области органического животноводства способны ускорить формирование устойчивого сектора органической молочной продукции [8].

Таким образом, мировой опыт показывает, что эффективная система сертификации органических молочных продуктов требует сочетания четкой нормативно-правовой базы, прозрачных процедур контроля, развитой инфраструктуры и высокого уровня доверия потребителей. Россия уже сделала важные шаги в этом направлении, сформировав законодательную основу и систему государственной регистрации производителей. В дальнейшем развитие органического молочного сектора будет зависеть от масштабов государственной поддержки, интеграции в международные системы сертификации и роста внутреннего спроса на экологически чистую продукцию. При последовательной реализации этих условий Россия имеет потенциал занять заметное место на мировом рынке органической молочной продукции и обеспечить устойчивое развитие сельских территорий.

Список литературы

1. Федеральный закон Российской Федерации от 03.08.2018 № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 2018. – № 32. – Ст. 5073.

2. Регламент (ЕС) 2018/848 Европейского парламента и Совета от 30 мая 2018 г. о производстве и маркировке органической продукции // Official Journal of the European Union. – 2018.

5. Баранов С.А. Международные стандарты сертификации органической продукции / С.А. Баранов // Экономика сельского хозяйства России. – Москва, 2020. – № 10. – С. 58-63.

6. Громов Д.П. Перспективы производства органического молока / Д.П. Громов // Молочная промышленность. – Москва, 2022. – № 4. – С. 33–37.

7. Тихонова Л.М. Государственное регулирование органического производства / Л.М. Тихонова // АПК: экономика, управление. – Москва, 2021. – № 9. – С. 41–46.

8. Павлов К.С. Органическая продукция на мировом рынке / К.С. Павлов // Аграрный вестник Урала. – Екатеринбург, 2019. – № 7. – С. 85-–90.

9. Романова Е.Г. Экологические требования к производству органической продукции / Е.Г. Романова // Пищевая промышленность. – Москва, 2022. – № 6. – С. 29–34.

10. Лебедев А.Н. Развитие органического животноводства / А.Н. Лебедев // Вестник аграрной науки. – Орёл, 2020. – № 5. – С. 70–75.

Осипова Т.П.
студент
Приволжский государственный университет путей сообщения
Россия, Самара
230334@stud.samgups.ru
Жебанов А.В.
к.т.н., доцент кафедры «Вагонное хозяйство и наземные транспортные комплексы»
Приволжский государственный университет путей сообщения
Россия, Самара
korkina@samgups.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Аннотация. Железнодорожный транспорт является приоритетным направлением при организации работы транспортного комплекса и логистики все страны, особенно в аграрной сфере. Подвижной состав (локомотивы, грузовые вагоны) обеспечивает надежность и своевременность перевозочного процесса сельскохозяйственных грузов, таких как зерновые культуры, продукты их переработки, минеральные удобрения и др. При этом эффективность работы транспортных коридоров во много зависит от исправного состояния вагонного парка и своевременного качественного контроля за техническим обслуживанием, проведенным ремонтом. Инновационный подвижной состав (грузовые вагоны) по своим характеристикам создавался не только для возможности увеличения объемов перевозимого груза (повышенная нагрузка на ось), но и перехода существующей системы технического обслуживании, ремонта (по пробегу или по сроку) по текущему состоянию. В настоящее время в этих процессах имеются факторы, которые влияют на препятствие создание системы обслуживания по состоянию вагона. Внедрение цифровых технологий таких как RFID-метка, технический планшет и искусственный интеллект, позволяет автоматизировать сбор данных, отслеживать технические характеристики вагонов и выявлять потенциальные неисправности на стадии их зарождения. Такой подход к организации перевозочного процесса способствует снижению простоев, повышению безопасности, уменьшает появлению несчастных случаев, увеличивает «полезный» срок службы грузовых вагонов. Все эти факторы положительно влияют на транспортировку сельскохозяйственных грузов, что особенно важно для перевозки скоропортящихся грузов и обеспечения стабильности поставок.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, сельскохозяйственные грузы, техническое обслуживание, грузовые вагоны, своевременная доставка, сохранение качества грузов, цифровизация, искусственный интеллект.

Osipova T.P.
Student
Volga State University of Railways
Russia, Samara
230334@stud.samgups.ru
Zhebanov A.V.
Candidate of Technology Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Car Engineering and Ground Transport Complexes
Volga State University of Railways

Russia, Samara
korkina@samgups.ru

ORGANIZATION OF THE PROCESS OF TRANSPORTING THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX BY RAIL

Abstract: Railway transport is a priority in organizing the work of the transport complex and logistics of all countries, especially in the agricultural sector. Rolling stock (locomotives, freight cars) ensures the reliability and timeliness of the transportation process of agricultural goods, such as crops, products of their processing, mineral fertilizers, etc. At the same time, the efficiency of the transport corridors largely depends on the serviceable condition of the railcar fleet and timely high-quality control over the maintenance carried out by the repair. According to its characteristics, innovative rolling stock (freight cars) was created not only for the possibility of increasing the volume of transported cargo (increased axle load), but also for the transition of the existing system of maintenance, repair (by mileage or by term) according to the current state. Currently, there are factors in these processes that affect the obstacle to the creation of a service system according to the state of the car. The introduction of digital technologies such as RFID tag, technical tablet and artificial intelligence allows you to automate data collection, track the technical characteristics of cars and identify potential malfunctions at the stage of their origin. This approach to the organization of the transportation process helps to reduce downtime, increase safety, reduce the occurrence of accidents, and increase the «useful» service life of freight cars. All these factors have a positive effect on the transportation of agricultural goods, which is especially important for the transportation of perishable goods and ensuring the stability of supplies.

Keywords: railway transport, agricultural cargo, maintenance, freight cars, timely delivery, preservation of cargo quality, digitalization, artificial intelligence.

Железнодорожные перевозки имеют приоритетное направление в организации логистических коридоров страны, естественно транспортировка продукции сельскохозяйственного производства имеет свои направления развития. Грузовые вагоны осуществляют перевозку таких грузов, как: зерно, минеральные удобрения, комбикорма, продукты питания и др. Для транспортировки необходима своевременная (минимальная по продолжительности) доставка в пункты назначения, так как по своим свойствам некоторые грузы при определенных факторах в условиях перевозки теряют свое качество. В свою очередь процесс перевозки грузов железнодорожным транспортом имеет следующие преимущества: объем, высокая степень безопасности, бесперебойность работы [1,2]. Для качественной работы вагонного парка необходимо быстрое реагирование на изменение технического состояние узлов грузовых вагонов, нацеленное на выявление предотказного состояния и поддержания грузовых вагонов в исправном состоянии. Такой подход способствует уменьшению длительности простоя грузовых вагонов под операцией восстановления или полностью исключения их (минимизация) между плановыми видами ремонта [3,4].

Надежность и бесперебойность процесса перевозки продукции сельскохозяйственного производства зависит от технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. Проводимые мероприятия являются важным

критерием для поддерживания эффективной работы, обеспечения надежности, долговечности и исключение аварийных ситуаций. Основными видами ремонтов грузовых вагонов являются капитальный (полное восстановление ресурса) и деповской (частичное восстановление с заменой ограниченного числа узлов).

Текущее техническое обслуживание (ТО) грузовых вагонов, проводимое между плановыми ремонтами для поддержания их исправного состояния, сталкивается с рядом проблем. Используемые инструменты, оборудование, программное обеспечение при техническом обслуживании грузовых вагонов в условии эксплуатации довольно устаревшее и требует усовершенствования [5,6]. Отсутствие или недостаток информации при определении дефектов на пунктах технического обслуживании (ПТО) может происходить из-за невозможности принятия во внимание отчетных документов о проведенных работах (это касается замены мелких деталей и составных частей грузовых вагонов, информация о которых вносятся только на бумажные носители). При таком подходе не всегда возможно сделать логические выводы о первопричине появления неисправностей, перешедшей в отказ детали или узла грузового вагона. Добавляет сложность в этот процесс появление нестандартных ситуаций и выявление не типичных неисправностей грузовых вагонов или их следствий. Не хватка информации при определении дефектов во время технического обслуживания грузовых вагонов связана с отсутствием уточнений при составлении перечня проводимых работ в отчетные документы, находящиеся на пункте технического обслуживания (далее ПТО). Особенно невозможно отследить на жизненном цикле между плановыми видами ремонта все заменные детали при проведении безотцепочного ремонта, не всегда указывается заменена комплектующих деталей на конкретный вагон или данные есть только на бумажном носителе (это касается не номерных деталей, мелких комплектующих и др.). В такой ситуации (в отдельных случаях) нельзя сделать конкретных выводов по какой причине произошло разрушение или отследить хронологию ее появления, чтобы сделать полный анализ и предпринять мероприятия для предотвращения выхода узла или детали из эксплуатации.

Применяя современные цифровые технологии в рамках развития цифровизации транспортной отрасли, становится возможным замена устаревших и неэффективных процессов управления в системе железнодорожного транспорта. Интегрируемая в настоящее время цифровая трансформация железной дороги предполагает внедрение инновационных технологий в её организационную структуру [7–9]. Эти мероприятия позволяют значительно автоматизировать и оптимизировать управление железнодорожным транспортом, конкретно вагонным хозяйством и способствует поддержанию на высоком уровне организацию транспортировки грузов агропромышленного комплекса.

Далее опишем вопросы, связанные с оптимизацией технического обслуживания грузовых вагонов с помощью внедрения в работу новейших

цифровых технологий. В качестве предлагаемой идеи рассмотрим взаимодействие системы, основанной на применении RFID-метки, технологического планшета и искусственного интеллекта.

RFID-метки – это электронные устройства для беспроводной идентификации и обмена данных посредством радиочастотных сигналов. Они обладают высокой устойчивостью к климатическим факторам, превосходной пыле-влагозащищённостью и способны работать в условиях повышенной вибрации. Эффективно интегрируясь в существующую IT-инфраструктуру, RFID-решения являются неотъемлемым компонентом современных информационных технологий, применяемых на железнодорожном транспорте.

Устройство с системами радиочастотной идентификации RFID будет интегрирована в систему для формирования различных отчетно-учетных форм (ВУ-23М, ВУ-36М и др.). Вся общая программа будет находится в техническом планшете. В процессе работы сотрудник сканирует метку и вносит всю актуальную информацию по конкретному вагону. Для оптимизации работы в системе уже составлен перечень данных, которые в процессе работы необходимо будет лишь выбрать. В случае если произошла замена детали или ситуация, которая связанна с эксплуатационными неисправностями, это вносится в отдельную графу. Вся это общая система несет себе ключевую информацию о грузовом вагоне (дата начала эксплуатации, последние ремонты и замена не номерных комплектующих входящих в узлы – валики, шплинты и т.д.). После внесения информации, система автоматически формирует необходимые формы уведомления в зависимости от потребностей. По окончанию при помощи цифрового помощника (искусственного интеллекта) составляется отчет о проделанной работе, пополняется база информации и проводится анализ состояния грузового вагона на всем протяжении жизненного цикла с проверкой предотказного состояние каких-либо узлов. Если система выявляет информацию о неоднократном ремонте или замене составляющей детали, крепежных элементов при техническом обслуживании, то она распознает этот грузовой вагон как потенциально опасный для осуществления бесперебойного движения. Вагон попадает в зону риска и следует до ближайшего ПТО с информацией о обязательном тщательном контроле определенного узла. При подходе на ПТО осмотрщики-ремонтники встречают поезд «сходу» и уделяют особое внимание заявленному вагону, также как и при последующем техническом обслуживании. Если выявляются дополнительные неисправности они должны быть устранены, а при не выявлении вводится в систему информация о адекватности работы узла или детали, находящейся в зоне риска. После проведения всех вышеописанных мероприятий грузовой вагон удается из перечня вагонов, находящихся в зоне риска.

Предлагаемых подход способствует увеличению «полезного» пробега различных грузовых вагонов, задействованных для нужд агропромышленного комплекса [10,11]. К примеру, грузовые вагоны, осуществляющие перевозку минеральных удобрений, имеют низкий период эксплуатации – 26

лет. Эта информация внесена в технический паспорт и обусловлена агрессивным воздействием груза на элементы конструкции. Также при длительной перевозке зерна есть предпосылки потери кондиции продукта или затруднения его выгрузки (так называемая «слеживаемость» зернового материала), т.к. продукт может превратиться в крупные куски или монолитную массу под действием собственного веса. Внедряя новые технологии, мы уменьшаем простой грузовых вагонов под технологическими операциями восстановления его работоспособности, с учетом выявления предотказного состояния узлов и тем самым увеличиваем его полезный пробег, минимизируя отклонения от графика доставки грузов в пункты назначения.

Железнодорожный транспорт играет большую роль в логистике аграрной отрасли сталкиваясь с проблемами, связанные с необходимостью быстрой и качественной доставки грузов. Оперативность доставки скоропортящихся и чувствительных к длительности транспортировки грузов критически важна. Несмотря на такие преимущества, как высокая грузоподъёмность, безопасность и стабильность, поддержание этих характеристик напрямую зависит от эффективности работы вагонного парка. Это требует оперативного реагирования на изменения технического состояния узлов и выявления их предотказных состояний, что позволит минимизировать простои и количество внеплановых ремонтов.

Результаты анализа технического обслуживания грузовых вагонов свидетельствуют о наличии ряда проблем, включая недостаточность информации, затруднения в отслеживании жизненного цикла деталей и отсутствие в некоторых ситуациях цифрового следа (замена не номерных деталей, комплектующих узлов – валики, шплинты и т.д.). Внедрение более эффективных процессов на новые цифровые технологии позволит оптимизировать работу и сделать ее более качественной. Предлагаемый подход, основан на интеграции системы RFID в совокупности с искусственным интеллектом в технологический планшет, направлен на качественное улучшение производственного процесса технического обслуживания. Система RFID, благодаря своей высокой устойчивости к внешним факторам, послужит надежным источником оперативных данных, в то время как искусственный интеллект будет способен выявлять скрытые закономерности и точно прогнозировать возможные неисправности. Реализация описываемой технологии позволит повысить уровень безопасности, сократить простой грузовых вагонов под различными операциями и оптимизировать эффективность работы вагонного парка для создания стабильного транспортного процесса для нужд аграрного комплекса.

Список литературы

1. Жебанов, А. В. Современные тенденции в обеспечении бесперебойности перевозочного процесса железнодорожного транспорта / А. В. Жебанов, С. В. Коркина // Вызовы и решения для бизнеса: ВЭД в новых реалиях : Сборник материалов III Международного внешнеэкономического научно-практического форума, Москва, 14 декабря 2022 года. –

Москва: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2023. – С. 119–122. – EDN TUWQBI.

2. Воеводина, С. П. Интеграция системы оценивания соответствия определенным требованиям при проведении аудита по технике безопасности на ППВ / С. П. Воеводина, А. В. Жебанов // Современные тенденции развития транспортной отрасли : материалы Международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 15–16 февраля 2024 года. – Нижний Новгород: Самарский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 206–213. – EDN UGUIRE.

3. Воеводина, С. П. Новый подход к организации ремонта вагонов, основанный на текущем техническом состоянии / С. П. Воеводина, А. В. Жебанов // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики : Материалы III Международной научно-методической конференции, посвященной 50-летию Самарского государственного университета путей сообщения, Самара, 21–22 марта 2023 года. – Оренбург: ОрИПС – филиала СамГУПС, 2023. – С. 17–20. – EDN XZUZUY.

4. Печенкина, Ю. А. Формирование базы данных с целью создания цифрового двойника грузового вагона при его эксплуатации / Ю. А. Печенкина, А. В. Жебанов // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования : Материалы международной научно-практической конференции, Казань, 10–11 апреля 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 519–521. – EDN LHGTPO.

5. Жебанов, А. В. Оптимизация осмотра грузовых вагонов на пунктах технического обслуживания при использовании возможностей искусственного интеллекта / А. В. Жебанов, Ю. А. Печенкина // Актуальные проблемы современного транспорта. – 2024. – № 4(18). – С. 27–36. – EDN WADQYG.

6. Протасова, А. Д. Цифровая маркировка, как инструмент контроля жизненного цикла деталей узлов и вагонов / А. Д. Протасова, А. В. Жебанов // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития : Материалы VI Международной научно-исследовательской конференции, посвященной 50-летию Самарского государственного университета путей сообщения, Самара-Оренбург, 18–19 апреля 2023 года. – Самара-Оренбург: ОрИПС-филиал СамГУПС в г. Оренбург, 2023. – С. 195–199. – EDN MSFXEU.

7. Воеводина, С. П. Применения технологии искусственного интеллекта для повышения качества технического обслуживания вагонов в эксплуатации / С. П. Воеводина, А. В. Жебанов // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития : Материалы VI Международной научно-исследовательской конференции, посвященной 50-летию Самарского государственного университета путей сообщения, Самара-Оренбург, 18–19 апреля 2023 года. – Самара-Оренбург: ОрИПС-филиал СамГУПС в г. Оренбург, 2023. – С. 38–42. – EDN NPLUNO.

8. Внедрение цифровых технологий в процесс обработки подвижного состава на пункте технической передачи (ПТП) / А. А. Ключко, И. В. Чепурченко, С. В. Коркина, Г. Г. Киселев // Вестник транспорта Поволжья. – 2025. – № 4(112). – С. 19–24. – EDN KIMXSY.

9. Козеев, Я. И. К вопросу цифровизации процесса контроля технического состояния грузовых вагонов на подходе к сортировочной станции к / Я. И. Козеев, С. В. Коркина // Наука и образование транспорту. – 2024. – № 1. – С. 24–26. – EDN ITNOTN.

10. Грузовой изотермический контейнер для перевозки и длительного хранения скоропортящихся грузов / В. И. Моисеев, Т. А. Комарова, О. А. Ворон, А. В. Жебанов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 297–302. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-12-297-298. – EDN XYMOFG.

11. Моисеев, В. И. Обеспечение температурного режима в контейнере при транспортировке грузов с малым сроком хранения / В. И. Моисеев, А. В. Жебанов // Наука и образование транспорту. – 2024. – № 1. – С. 45-48. – EDN LMSUBA.

Рахманов Н.И.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
www.nazim98@mail.ru
Скопинцев И.В.
к.т.н., профессор кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
iscopincev@mail.ru
Гафаров В.А.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vuqarcik.qafarov@inbox.ru

ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИГРАФИЧЕСКИХ ОТХОДОВ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация. из-за увеличения объёмов многослойных полиграфических упаковочных отходов увеличивается необходимость разработки новых методов их переработки. Традиционные методы утилизации – сжигание и механическая переработка обладают низкой экологической и экономической эффективностью. Возможно применение биотехнологических методов. В настоящей работе проведён обзор современных исследований, посвящённых биоконверсии полиграфических отходов и полимерных композитов, ориентированной на получение биогаза и биоэтанола. На основе аналитического обзора зарубежных и отечественных источников показано, что целлюлозная составляющая упаковочных отходов (45–75%) представляет собой перспективное сырьё для биоконверсии, несмотря на наличие трудноразлагаемых полимерных слоёв.

Ключевые слова: полиграфические отходы, ламинированный картон, тетра-пак, биоэтанол, биогаз, анаэробное сбраживание, ферментативный гидролиз, целлюлоза, полимеры.

Rakhmanov N.I.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
www.nazim98@mail.ru
Skopintsev I.V.
Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department
of Chemical Engineering Processes and Apparatus
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
iscopincev@mail.ru
Gafarov V.A.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vuqarcik.qafarov@inbox.ru

PROCESSING OF POLYGRAPHIC WASTE BY BIOTECHNOLOGICAL METHOD

Abstract. due to the increase in the volume of multilayer printing packaging waste, the need to develop new methods for their processing increases. Traditional disposal methods – incineration and mechanical processing have low environmental and economic efficiency. Biotechnological methods may be used. In this work, a review of modern studies on the bioconversion of printing waste and polymer composites focused on the production of biogas and bioethanol was carried out. Based on an analytical review of foreign and domestic sources, it was shown that the cellulose component of packaging waste (45–75%) is a promising raw material for bioconversion, despite the presence of hardly decomposable polymer layers.

Keywords: polygraphic wastes, laminated cardboard, tetra-pack, bioethanol, biogas, anaerobic digestion, enzymatic hydrolysis, cellulose, polymers.

Ламинированный картон – это многослойный упаковочный материал, состоящий из комбинации целлюлозного картонного слоя с внешними покрытиями из полимеров (чаще всего полиэтилен) и иногда тонкого алюминиевого слоя.

Полимер-ламинированный картон состоит преимущественно из: 70–85% целлюлозы, 15–30% полиэтилена (обычно LDPE), 5% алюминиевая фольга.

Целлюлоза – полисахарид, основной компонент растительных клеточных стенок. Она состоит из длинных цепей глюкозы, соединённых β-1,4-гликозидными связями. Это энергоёмкое сырьё, стабильное, но поддающееся биодеградации при использовании химической предобработки, ферментативных процессов и микробиологической конверсии.

На основе изучения работ у отходов полиграфического производства есть достоинства – это чистота волокон сырья и доступность, что в свою очередь является и актуальной проблемой, которую необходимо решать [1–4].

Биогаз – это газовая смесь, образующаяся в результате анаэробного (безкислородного) разложения органического вещества микроорганизмами.

Типичный состав:

- 50–75% метан (CH_4) – основной энергетический компонент,
- 25–50% $_{CO2}$,
- следы H_2, H_2S, NH_3, водяного пара.

Свойства и Достоинства биогаза:

- Нижняя теплотворная способность ~21–25 MJ/m^3.
- Может использоваться в когенерации (CHP) для производства тепла/электричества.
- Может быть очищен до биометана, аналогичного природному газу.
- Производится из дешёвого/отходного сырья.

Отходы ламинированного картона являются подходящим вариантом для получения данного вещества из-за своего состава.

Биоэтанол – это этиловый спирт, полученный биотехнологическим путём из сахаров, крахмалистых материалов или целлюлозы. Этанол является

важным компонентом биотоплива (бензины E5-E85) и технологического спирта.

Свойства:

- Теплотворность ~26.8 MJ/kg.
- Высокая октановая характеристика (RON ~109).
- Смесимость с бензином.
- Легко транспортируется и хранится.

Достоинства биоэтанола второго поколения (из целлюлозы)

- Не конкурирует с продовольствием.
- Использует отходы (макулатуру, шлихи, картонные упаковки).
- Обладает улучшенным углеродным следом по сравнению с топливами первого поколения.

Необходима предварительная обработка целлюлозы, так как это сложный полимер. Необходимо разрушить структуру и превратить её в доступные сахара.

Основные стадии получения биотоплива из целлюлозы:

- Предварительная обработка – разрушение структуры целлюлозы.
- Гидролиз – превращение полисахаридов в моносахариды (глюкозу).
- Ферментация – превращение сахаров в биотопливо.

Главная экологическая проблема таких отходов – многослойность, делающая обычную переработку недоступной без специальных технологий разделения.

На основе всей имеющейся информации было принято решение рассмотреть варианты переработки биотехнологическим методом, позволяющим извлекать целлюлозу из состава ламинированной упаковки для дальнейшего получения биогаза и биоэтанола, а также получать не только целлюлозу, но и другие материалы для повторного применения их в дальнейшем.

В работе [4] изучается измельчение полиграфических отходов и дальнейшая обработка полученного измельчённого материала смесью целлюлозных ферментов для гидролиза целлюлозы (бумажной/картонной части). В результате опыта в течение 24 часов получалось ~ 15 мМ глюкозы.

После удаления целлюлозы следует биовыщелачивание (bioleaching) алюминия – с помощью бактерий, которые продуцируют серную кислоту, алюминий переходит в раствор, в течение 3–7 дней удаётся извлечь > 95% алюминия.

Далее – из раствора алюминия восстановление (осаждение) алюминия при pH ≈ 6.4 в виде гидроксида алюминия. Таким образом алюминий можно вернуть как металл (или его оксид/гидроксид) для последующего использования.

В итоге остаётся полиэтилен (PE), который можно перерабатывать – авторы использовали его для повторного перерасплава и производства плёнок. Механические свойства этих плёнок соизмеримы с коммерческим полиэтиленом.

Таким образом, предложен полный «замкнутый цикл» переработки:

- бумага → ферментативная абразия;
- алюминий → биовыщелачивание и восстановление;
- полиэтилен → повторное использование.

Полученный полиэтилен (PE) после переработки показал характеристики, сопоставимые с новым материалом.

При масштабировании в 1-литровом реакторе процесс сохранил эффективность – что говорит о потенциальной промышленной реализуемости.

В конце почти весь массированный поток перерабатываемого материала был возвращён в полезное состояние; доля, требующая утилизации (сжигания или иного), составила < 5%.

Данное исследование говорит о том, что переработка ламинированного картона отлично подходит для получения материалов разного типа. Так же могут быть решены проблемы с огромным количеством отходов данного типа.

В статье [6] рассматривается переработка макулатуры в биоэтанол.

Авторы брали отходы, как обычную макулатуру (print-grade paper), так и картонные упаковки (включая гофрокартон/картонные коробки), превращали их в суспензии через гидропульпер, а затем прямо (без сильной термохимической предобработки) гидролизовали целлюлозные волокна, брожение с дрожжами «Saccharomyces cerevisiae» и получали этанол.

Химический состав: картонные суспензии имели ~ 53.5% целлюлозы, ~ ~5% лигнина, что делает их весьма подходящим сырьём для биоконверсии.

Глюкозы после гидролиза и последующего брожения оказалось достаточно, а полученный биоэтанол имел характеристики, сходные с лабораторным этанолом (чистота, отсутствие токсичных примесей).

Авторы сделали акцент на бумажные и картонные отходы – «дешёвое, широкодоступное, недоиспользуемое» сырьё, превращение которого в биоэтанол сокращает объёмы свалок, уменьшает выбросы парниковых газов при сжигании либо захоронении.

Достоинства:

Отсутствие необходимости в агрессивной термохимической предобработке: простая гидролизация и ферментация. Это делает технологию более доступной.

Картон/отходы имеют высокую долю целлюлозы и низкий лигнин – благоприятно для ферментации.

Экологическая польза: переработка отходов и получение устойчивая биомассы/топлива, уменьшение захоронений.

Недостатки:

У них был относительно низкий выход сахара из гидролиза (экстракционная эффективность ~31–33%) при кислотном гидролизе. Это значит, что далеко не вся целлюлоза отдаёт сахар.

При отсутствии мощной предобработки возможны остатки – неполный гидролиз, остающийся лигнин, примеси, которые могут ингибировать ферментацию.

Эта работа демонстрирует, что даже «обычные» бумажные/картонные отходы можно относительно просто превратить в биоэтанол – без сильной предобработки. По итогу отходы упаковки, ламинированного картона и подобных материалов могут быть ресурсом для топлива.

В статье [7] рассматривается переработка отходов тетра-пак (целлюлозная часть) в биоэтанол (Рис. 1).

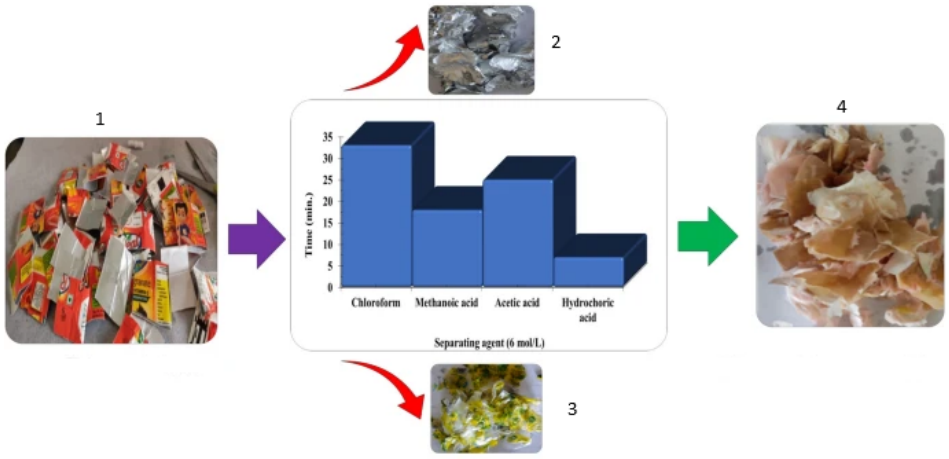


Рис. 1. Переработка тетрапаков:
1 – отходы Тетрапак; 2 – слой алюминия; 3 – слой LDPE; 4 – полученная целлюлоза

Авторы выделили целлюлозную массу из тетра-пак отходов: из 180 г исходного тетра-пака удалось получить 145 г целлюлозной пульпы (что составляет примерно 80% от массы).

Затем cellulase (фермент из штамма Bacillus sp.) гидролизовал пульпу, и удалось получить редуцирующие сахара с концентрацией ~32.72 mg/ml. При этом эффективность сахарификации составила ~44.6%.

Гидролизаты далее ферментировали дрожжами S. Cerevisiae.

Достоинства:

Сложный многослойный упаковочный материал после отделения нецеллюлозных слоёв, может эффективно дать целлюлозную массу для гидролиза.

Эффективность сахарификации (≈ 44.6%) далека от теоретической максимальной – значительная часть целлюлозы остаётся нераспознанной или недоступной для ферментов.

В статье описан лишь лабораторный масштаб (180 г), неизвестно, как это масштабируется на тонны, а также не показаны дальнейшие этапы (очистка, дистилляция, экономическая модель).

Вывод: очень многообещающая работа, прямо связанная с вашей задачей – показывает, что тетра-пак можно «апсайклировать» в биоэтанол. Но чтобы это стало практической технологией – нужно оптимизировать эффективность сахарификации, масштаб, предусмотреть обработку нецеллюлозной фракции, очистку, и сделать технико-экономический анализ.

В работе [8] описывается ферментация бумажной шламы / бумажных отходов с высоким содержанием твердого вещества.

В этой работе оценивали масштабируемость ферментации бумажной шламы (paper sludge, PS) в 50-литровом пилотном биореакторе при высокой концентрации твердого вещества (40% w/w).

При дозе ферментов 10 FPU/г сухой шламы и использовании промышленного штамма дрожжей (Ethanol Red) достигли титра этанола 86.2 г/L.

Это показывает, что бумажные шламы – остаточный поток от бумажной промышленности, ранее часто просто складируемый или утилизируемый – могут быть превращены в концентрированный биоэтанол на пилотном уровне.

Достоинства / сильные стороны:

Высокая концентрация твердых веществ – уменьшает объёмы обработки, снижает энергозатраты на сушку/отвод воды, что улучшает экономику.

Промышленные штаммы дрожжей и сравнительно низкое содержание добавленных ферментов делают процесс более жизнеспособным с точки зрения затрат.

Недостатки:

Работа на «виргинальной» (новой) шламе (paper sludge from virgin pulp) – возможно, состав отличен от бытовых картонных/тетра-отходов, что даёт более благоприятные условия; значит, для ваших ламинированных картонов может потребоваться доработка.

Не все шламы одинаковы: состав, загрязнения, лигнин, тонеры, химикаты могут сильно варьироваться – потребуется тщательный анализ перед масштабированием.

В работе [9] описывается анаэробное сбраживание смеси пищевых отходов и картона.

Авторы исследовали двухступенчатую систему (CSTR → UASB) для полугорячего (semi-continuous) анаэробного сбраживания смеси пищевых отходов и картона (corrugated cardboard).

При различных соотношениях пищевых отходов / картона и нагрузках (OLR, organic loading rate), наилучшие показатели метана получены при ~ 65% пищевых отходов / 35% картона и OLR ≈ 16 г COD / L·d. При этом UASB стабильно работал, и метановый выход был высоким.

Система демонстрировала адаптивность к изменениям состава кормовой смеси и нагрузки – то есть её можно использовать в условиях реального смешанного потока отходов, не обязательно чисто картон.

Достоинства / сильные стороны:

Показывает, что даже картон + пищевые отходы (что ближе к реальному потоку ТБО) можно перерабатывать анаэробно, без сложной предварительной обработки, и получать метан – что ценнее, чем просто захоронение или сжигание.

Двухступенчатая конфигурация (CSTR + UASB) даёт стабильность, гибкость состава, и хорошую устойчивость микробных сообществ при вариациях – важно для «мусорной» практики.

Недостатки:

Для стабильной работы нужен контроль загрузки, состав – слишком высокий процент картона (лишь картон без пищевых отходов) даёт низкую эффективность. То есть, идеально смесь, а не чистый картон.

Картон – медленно биодеградируемый материал, особенно гофрированный, поэтому скорость метанизации меньше, чем для пищевых отходов

В работе [10] изучается получение биоэтанола из бумажных технологических отходов.

Общий обзор показывает, что бумажная промышленность генерирует большие объёмы отходов (бумажной шламы (paper sludge, PS)), которые не пригодны для повторного производства бумаги, и часто утилизируются неправильно (сжигание, свалки) – что экологически и экономически неэффективно.

Такие шламы содержат значительный процент целлюлозы (глюканов), которые можно гидролизовать

При правильной обработке, оптимизации ферментации, можно получить конкурирующие с традиционными биотопливами объёмы, что делает процесс потенциально эффективным в разных направлениях.

Основные выводы по данным работам:

Эффективность гидролиза целлюлозы из полиграфических отходов часто далека от идеальной (в статьях ~ 40–45%).

Необходима либо механическая, либо химическая, либо энзимная: предобработка – отделение не целлюлозных слоёв (PE, Al) или возможно совместимая ферментативная схема. Это добавляет технологическую сложность и затраты в процесс.

При анаэробной переработке чистый картон это не лучший субстрат. Для стабильной метанизации лучше использовать смеси картона и пищевых, агропромышленных отходов.

При рассмотрении данного вопроса были исследованы смеси на основе отходов ламинированного картона и соломы, кукурузных стеблей, свекловичного жома и навоза.

Картон повышает удельное содержание углерода что характеризует собой стабильный метаногенез. При предварительной обработке целлюлоза легко гидролизуется. Так же данный материал работает как структурный наполнитель, что предотвращает закисание при избытке влажных агроотходов.

Таблица

Сравнение типов отходов и их потенциал для биоэнергетики/биоконверсии

Тип сырья / отходов	Содержание целлюлозы	Метод конверсии	Итог
Бумажные шламы	Высокое содержание целлюлозы + углеводов; зола / зольный остаток может быть значительной.	Энзиматическая сахарификация + SSF / fed-batch, иногда + AD (метан) после ферментации дрожжами	– Этанол: до ~100 г/л при высоких нагрузках (40% сухого вещества) – В более типичных реакторах: 34–46 г/л с выходом 66–87% от теоретического. – Биогаз: метан ~ 31.6–54.4 л/кг PS (в зависимости от типа шлама)
Гофрокартон	Относительно высокий процент клеточатки/глюканов, но есть лигнин, клеи, адгезивы, загрязнения	Энзимная сахарификация + SSF / fed-batch; иногда AD в смеси с пищевыми отходами.	Этанол: ~45.5 г/л при 27% сухого вещества для corrugated recycle PS, выход ~78% от теоретического.
Ламинированный картон	Содержит целлюлозную бумажную/картонную основу + полиэтилен (PE), алюминий (или фольгу), клеи, покрытия, барьеры, возможно, лаки/пигменты	Ферментация «многослойной бумажной упаковки (ML)» + дрожжи (SSF) – мало изучено	Исследований и конкретного выхода нет, а значит есть смысл в дальнейшем изучении и выполнении опытов.

В результате изучения работ [4–10] были сделаны выводы, теоретические оценки выходов биоэтанола и биометана (CH_4) при переработке 1 тонны ламинированного картона. Расчёты основаны на литературных данных по содержанию бумаги в упаковке (75%), доле целлюлозы в бумажной фракции (варианты 50%, 70%, 90%), а также на эмпирических значениях эффективности ферментативного гидролиза и метанового потенциала (BMP).

Теоретические расчеты:

Исходя из данных, полученных при анализе указанных работ [1–10] имеем:

Масса единицы: 1 т = 1000 кг ламинированного картона.

Фракции: бумажная – 75% массы (750 кг), полиэтилен (PE) – 20% (200 кг), алюминий/прочие – 5% (50 кг)

Содержание целлюлозы в бумажной фракции:

- 50% от бумажной фракции → целлюлоза = 0.50 × 750 = 375 кг/т.
- 70% → 0.70 × 750 = 525 кг/т.
- 90% → 0.90 × 750 = 675 кг/т.

Биохимические допущения:

- Стехиометрия: 1 g целлюлозы → 1.11 g глюкозы (гидролиз с присоединением воды).
- Эффективность ферментативного гидролиза: η_h = 85% (0.85).
- Теоретический выход этанола: 0.51 pEtOH / g глюкозы; практическая эффективность ферментации: η_f = 80% (0.80).

Плотность этанола pEtOH = 0.789 кг/L.

Практический BMP для целлюлозы: 0.360 L CH_4 / g целлюлозы (360 L/kg).

Энергетические характеристики: LHV этанола ≈ 21.2 MJ/L; LHV метана ≈ 35.8 MJ/m^3.

Формулы для расчета:

1. Масса целлюлозы:

$Mc = Mo \cdot fp \cdot fc,$

где: M_C = 1000 кг; f_p=0.75; fc (0.5,0.7,0.9)

2. Расчет массы глюкозы (с учетом гидролиза):

$$m_{gl} = Mc \cdot \eta_h$$

3. Расчет для биоэтанола:

$Me1 = m_{gl} \cdot 0.51 \cdot \eta_f$ (расчет в граммах)

$Me2 = \frac{Me1}{1000}$ (расчет в килограммах)

$Ve3 = \frac{Me2}{pEtOH}$(расчет в литрах)

4. Расчет для биогаза:

$V_{CH4} = Mc \cdot 1000 \cdot BMP$ (литр)

$V_{CH4} = \frac{V_{CH4}}{1000}$ ($м^3$)

5. Расчеты по получение энергии:

$$Ee = Ve3 \cdot 21.2$$

$$E_{CH4} = V_{CH4} * 35.8$$

На основе литературного обзора и модельных расчётов предложены математические модели для оценки выхода глюкозы, этанола и метана как функции содержания целлюлозы и эффективности гидролиза/ферментации. Выполнены теоретические расчёты выходов и энергооценка для трёх сценариев содержания целлюлозы в бумажной фракции (50%, 70%, 90%) при стандартных допущениях (ферментативный гидролиз η=85%, ферментация η=80%, практический BMP для целлюлозы 0.360 L CH_4/g), так же построены графики (Рис. 2 и 3)

Результаты расчётов на 1 т отходов:

1. целлюлоза 375.0 кг; этанол 183.0 L; метан 135.0 m3; энергия: этанол 3878.8 MJ, CH4 4833.0 MJ; время (этанол/биогаз) 6/28 суток.

2. целлюлоза 525.0 кг; этанол 256.1 L; метан 189.0 m3; энергия: этанол 5430.3 MJ, CH4 6766.2 MJ; время (этанол/биогаз) 5/25 суток.

3. целлюлоза 675.0 кг; этанол 329.3 L; метан 243.0 m3; энергия: этанол 6981.8 MJ, CH4 8699.4 MJ; время (этанол/биогаз) 4/22 суток.

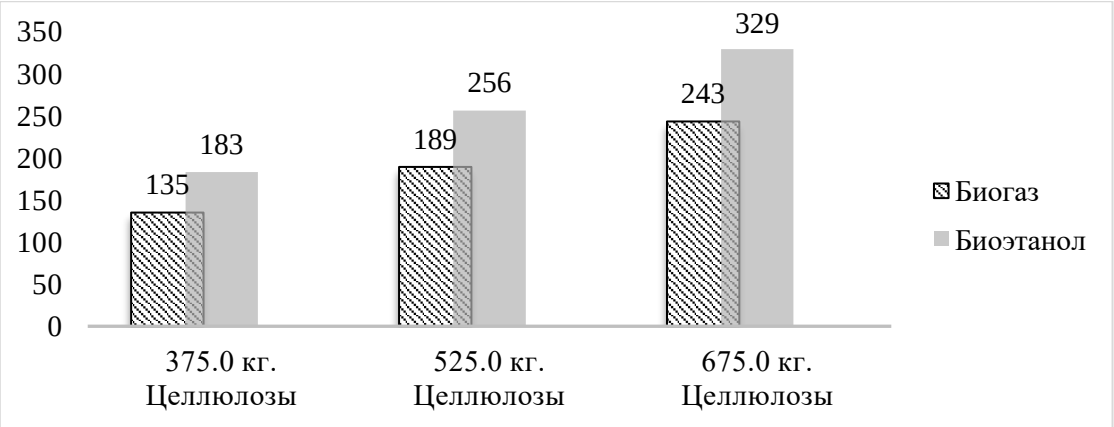


Рис. 2. Теоретический выход биопродуктов из 1 тонны отходов ламинированного картона

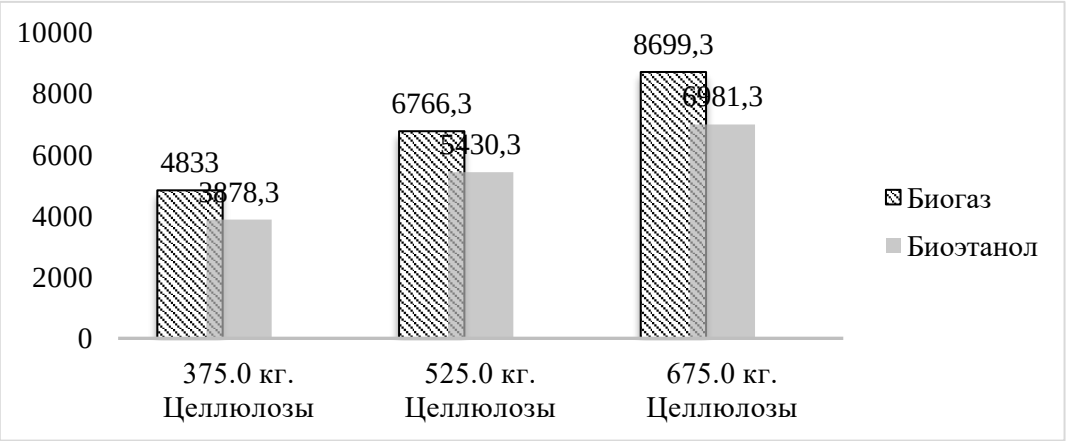


Рис. 3. Энергетическая ценность продуктов

На основании обзора литературы и сделанных расчетов можно сформулировать следующие выводы для дальнейшей работы над данной темой:

1. Ламинированный картон является перспективным ресурсом для переработки биотехнологическим путем – при типичном содержании бумажной фракции около 75% и средней доле целлюлозы около 70% возможен выход порядка 200–320 литров биоэтанола или 150–200 м^3 биогаза на тонну сырья.

2. Ферментативный маршрут (гидролиз + брожение) выдает более высокую энергетическую ценность в продукте (биоэтанол), но требует больших затрат из-за сложной технологической цепочки выполнения.

3. Анаэробный маршрут (получение биогаза) легче реализуется технически и технологически, не требует высокой частоты субстрата, позволяет использовать ламинированный картон в сочетании с агропромышленными отходами и дает быстрый выход энергии, но специфическая энергетическая плотность метана ниже по массовому выходу в сравнении с этанолом.

4. Основные проблемы – наличие полиэтилена, фольги, лаков в ламинированном картоне, что требует отделения слоев, эффективность гидролиза (около 70–85%), влияние ингибиторов (красителей, клеев) на ферментацию.

5. Краткие экономические итоги, следующие из обзора – этанол требует дополнительной стадии дистилляции для получения товарного продукта, биогаз требует системы очистки и, возможно, дальнейшей компрессии.

Основным выводом является то, что данная тема очень перспективна и мало изучена. На основе данных, которые были получены в ходе анализа можно приступить к реальным экспериментам.

Список литературы

1. Рахманов, Н.И. Особенности переработки отходов полиграфического производства / Н. И. Рахманов, И. В. Скопинцев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2024. – № 1. – С. 19–24. – EDN YUHTBQ.

2. Рахманов, Н.И. Особенности и актуальные проблемы переработки ламинированного картона / Н. И. Рахманов, И. В. Скопинцев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2024. – № 3. – С. 14–23. – EDN EFQSKY.

3. Рахманов, Н.И. Моделирование процессов переработки отходов ламинированного картона / Н. И. Рахманов, И. В. Скопинцев // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2024. – № 4. – С. 14–21. – EDN VVMBXE.

4. Kremser, K., Gerl, P., Borrás, A. B., Espinosa, D. R., Martínez, B. M., Guebitz, G. M., & Pellis, A. (2022). Bioleaching/enzyme-based recycling of aluminium and polyethylene from beverage cartons packaging waste. Resources, Conservation and Recycling, 185, 106444. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2022.106444

5. Şahin, G. G., & Karaboyacı, M. (2021). Process and machinery design for the recycling of tetra pak components. Journal of Cleaner Production, 323, 129186. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.129186

6. Kolajo, T. E., & Onovae, J. E. (2023). Biochemical conversion of waste paper slurries into bioethanol. Scientific African, 20, e01703. https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01703

7. Rinki, Yadav, P., Sharma, A. et al. Upcycling of tetra pack waste cellulose into reducing sugars for bioethanol production using Saccharomyces cerevisiae. Biotechnol Sustain Mater 1, 4 (2024). https://doi.org/10.1186/s44316-024-00003-0

8. van Dyk, J., Görgens, J.F. & van Rensburg, E. Valorisation of Industrial Waste for Second-Generation Ethanol Production: Towards the Scale-Up of High-Solids Paper Sludge Fermentation. Waste Biomass Valor 16, 4449–4461 (2025). https://doi.org/10.1007/s12649-025-02962-5

9. Caitlin M. Asato, Jorge Gonzalez-Estrell, Donald S. Skillings, Andrea Vargas Castaño, James J. Stonec and Patrick C. Gilcreasea. Anaerobic digestion of synthetic food waste-cardboard mixtures in a semi-continuous two-stage system (2019) https://doi.org/10.1039/C9SE00667B

10. Or-Chen, D., Gerchman, Y., Mamane, H., & Peretz, R. (2024). Paper-Mill Wastes for Bioethanol Production in Relation to Circular Economy Concepts: A Review. Applied Sciences, 14(3), 1081. https://doi.org/10.3390/app14031081

Левина Т.А.
к.э.н., заведующий кафедрой «Стандартизации, метрологии и сертификации»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Gta03@mail.ru
Клочков Я.М.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
gluhihyak@gmail.com
Клочкова Д.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Ddasha2017@yandex.ru
Носкова В.Е.
ассистент Центра проектной деятельности
Московский политехнический университет
Россия, Москва
pond5084@gmail.com

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ НА СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ЕЕ РЕШЕНИЮ

Аннотация. Проведён анализ факторов, ограничивающих эксплуатационную надёжность сельскохозяйственной техники в Российской Федерации. На основе статистических данных машиноиспытательных станций рассмотрены основные виды и причины отказов, влияние региональных условий и системные недостатки действующей планово-предупредительной системы технического обслуживания и ремонта. Установлено, что одной из ключевых причин низкой надёжности является несоответствие между нормативными требованиями ГОСТ 24925-81, предусматривающими наличие встроенных средств диагностирования, и их фактическим отсутствием на серийных отечественных тракторах. Проанализированы мировые тенденции перехода к обслуживанию по фактическому состоянию с использованием цифровых технологий, бортовых компьютеров и методов искусственного интеллекта. Обоснована необходимость создания специализированной бортовой системы контроля и измерения надёжности, способной в режиме реального времени оценивать текущую безотказность наиболее нагруженных узлов и агрегатов. Сформулированы первоочередные научно-технические задачи, включающие разработку методики определения безотказности по косвенным параметрам и создание аппаратной реализации системы.

Ключевые слова: надёжность; сельскохозяйственная техника; эксплуатация; техническое обслуживание; безотказность; бортовая диагностика; контроль по фактическому состоянию.

Levina T.A.
Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University

Russia, Moscow
Gta03@mail.ru
Klochkov Y.M.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
gluhihyak@gmail.com
Klochkova D.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Ddasha2017@yandex.ru
Noskova V.E.
Assistant at the Project Activity Center
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
pond5084@gmail.com

THE PROBLEM OF ENSURING RELIABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY AT THE OPERATIONAL STAGE AND PERSPECTIVE APPROACHES TO ITS SOLUTION

Abstract. The analysis of factors limiting the operational reliability of agricultural machinery in the Russian Federation has been carried out. Based on statistical data from machine testing stations, the main types and causes of failures, the influence of regional conditions, and systemic shortcomings of the existing scheduled preventive maintenance and repair system are considered. It has been established that one of the key reasons for low reliability is the discrepancy between the regulatory requirements of GOST 24925-81, which provide for built-in diagnostic tools, and their actual absence on serial domestic tractors. Global trends towards the transition to condition-based maintenance using digital technologies, on-board computers, and artificial intelligence methods are analyzed. The necessity of creating a specialized on-board system for monitoring and measuring reliability, capable of evaluating in real time the current failure-free operation of the most loaded units and assemblies, is substantiated. Priority scientific and technical tasks are formulated, including the development of a methodology for determining failure-free operation by indirect parameters and the creation of the system's hardware implementation.

Keywords: reliability; agricultural machinery; operation; maintenance; failure-free operation; on-board diagnostics; condition-based monitoring.

Обеспечение высокой эксплуатационной надёжности машинно-тракторного парка является одной из приоритетных задач агропромышленного комплекса Российской Федерации. По данным многолетних наблюдений, проводимых на базе машиноиспытательных станций, основная доля отказов сельскохозяйственных машин приходится на унифицированные элементы – подшипники, гидравлические рукава, ремённые передачи и датчики, – качество которых не всегда находится в прямой зоне ответственности заводов-изготовителей конечной техники [1]. При этом установлено, что около четверти всех затрат хозяйств на запасные части направляется на приобретение именно таких элементов, выпускаемых сторонними поставщиками. Парк

машин характеризуется высокой степенью физического износа, значительной разнородностью по срокам службы и преобладанием техники, эксплуатируемой за пределами нормативных сроков амортизации.

Ситуация усугубляется рядом сопутствующих факторов организационного и технологического характера. К их числу следует отнести неудовлетворительные условия хранения машин в межсезонный период, зачастую под открытым небом, ведущие к ускоренному развитию коррозионных процессов; повсеместное применение топливно-смазочных материалов с отклонениями от требований технической документации; а также нарастающий дефицит квалифицированных кадров механизаторов и инженерно-технического персонала [2]. Совокупное влияние этих факторов приводит к росту числа внезапных отказов и, как следствие, к увеличению продолжительности простоев, что особенно критично в периоды проведения посевных и уборочных работ.

Действующая в настоящее время система технического обслуживания и ремонта (ТОР) в значительной степени опирается на планово-предупредительный принцип, сформировавшийся в иных экономических условиях и ориентированный на фиксированные межремонтные интервалы, назначаемые по наработке без объективного учёта реального технического состояния конкретного изделия [3]. Такой подход, с одной стороны, влечёт необоснованные затраты на замену ещё работоспособных агрегатов, а с другой – не способен предотвратить внезапные отказы, развивающиеся в промежутках между регламентными обслуживаниями. Таким образом, существующая система ТОР не может рассматриваться как инструмент управления запасом потенциальных возможностей машины, заложенных при изготовлении и пополняемых при обслуживании.

Дополнительным сдерживающим фактором является длительный разрыв между нормативной базой и практикой её применения. ГОСТ 24925-81 «Техническая диагностика. Тракторы. Приспособленность к диагностированию» ещё в 1981 г. определил перечень типовых элементов контроля (ТЭК), включающий комплект встроенных измерительных преобразователей (ТЭК-9), комплект допускового контроля (ТЭК-10) и бортовую автоматизированную систему диагностирования (ТЭК-11) [4]. Однако элементы ТЭК-9 – ТЭК-11 в серийных отечественных тракторах до настоящего времени не применяются. Основная причина заключается в отсутствии завершённого теоретического обоснования и практически реализуемой аппаратной базы для непрерывного контроля надёжности.

Анализ мирового опыта показывает устойчивую тенденцию к переходу от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию, основанному на непрерывном мониторинге ключевых параметров машин. Концепция Prognostics and Health Management, активно развиваемая применительно к тяжёлой технике, предполагает интеграцию сенсорных технологий и аналитических алгоритмов для оценки остаточного ресурса и

прогнозирования отказов в режиме реального времени [5]. Современные зарубежные тракторы оснащаются бортовыми компьютерами, которые не только управляют работой двигателя, трансмиссии и навесных систем, но и выполняют непрерывную самодиагностику. В Российской Федерации работы в данном направлении ведутся, однако темпы их внедрения остаются низкими [6].

Цифровые технологии открывают новые возможности для управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники. Методы, основанные на алгоритмах искусственного интеллекта, позволяют реализовать стратегию предиктивного обслуживания, представляющую собой комплексный подход к определению текущего состояния машины и оценке оптимального момента проведения технического обслуживания [7]. Для этого разрабатываются диагностические устройства и датчики, объединяемые в информационные комплексы, обеспечивающие сбор и обработку больших объёмов данных о параметрах технического состояния с применением нейросетевых алгоритмов [8, 9–11].

Целью настоящей работы явилось комплексное исследование факторов, ограничивающих эксплуатационную надёжность сельскохозяйственной техники, и обоснование перспективных подходов к её повышению на основе перехода к обслуживанию по фактическому состоянию.

Материалом для исследования послужили статистические данные об отказах сельскохозяйственной техники, собранные на машиноиспытательных станциях и в хозяйствах Российской Федерации за период 2018–2024 гг. Анализировались сведения о наработке на отказ, видах и причинах отказов для основных типов тракторов (гусеничных и колёсных) отечественного и зарубежного производства. В качестве базовых объектов для рассмотрения выбраны наиболее массовые модели: ДТ-75, МТЗ-80/82, а также их современные модификации.

Методология исследования включала системный анализ нормативной документации (ГОСТ 24925-81, ГОСТ 27.002-2015), сравнительный обзор существующих и перспективных систем бортовой диагностики, а также обобщение опыта внедрения технологий обслуживания по фактическому состоянию в смежных отраслях машиностроения. При разработке методологии учитывались существующие подходы к стандартизации и контролю качества полупроводниковых компонентов, применяемых в датчиках сельскохозяйственной техники [10].

Анализ статистики отказов и системы ТОР

Проведённый анализ статистических данных (Таблица 1) позволил выявить, что основная доля отказов (до 60%) приходится на элементы ходовой части, трансмиссии и навесной системы. При этом около 40% отказов носят внезапный характер и не могут быть предотвращены в рамках действующей системы планово-предупредительного обслуживания.

Таблица 1

Распределение отказов по основным узлам сельскохозяйственных тракторов (усреднённые данные за 2018–2024 гг.)

Узел / агрегат	Доля отказов,%	Характер отказов
Ходовая часть	35	Износ, усталостные разрушения
Трансмиссия	25	Износ, задиры, разрушение подшипников
Навесная система	20	Деформации, трещины, износ шарниров
Двигатель	15	Износ ЦПГ, отказы топливной аппаратуры
Прочие	5	

Несоответствие нормативной базы и практики

Сравнительный анализ требований ГОСТ 24925-81 и реального оснащения серийных тракторов выявил полное отсутствие элементов ТЭК-9, ТЭК-10 и ТЭК-11 на отечественной технике (Таблица 2). Причиной является отсутствие как теоретической базы, так и готовых технических решений, позволяющих реализовать непрерывный контроль надёжности в рамках «допускового» принципа.

Таблица 2

Соответствие оснащения серийных тракторов требованиям ГОСТ 24925-81

Типовой элемент контроля	Требование ГОСТ 24925-81	Фактическое наличие на серийных тракторах
ТЭК-9	Комплект встроенных датчиков	Отсутствует
ТЭК-10	Комплект допускового контроля	Отсутствует
ТЭК-11	Бортовая система диагностирования	Отсутствует

Применительно к наиболее массовым отечественным тракторам, наиболее критичными с точки зрения внезапных отказов являются элементы ходовой части, навесной системы и трансмиссии. Именно эти агрегаты должны стать первоочередными объектами контроля в рамках перспективных бортовых систем.

Принципиально важно, что система контроля надёжности нового поколения должна оперировать не формальными признаками выхода контролируемого параметра за границы допуска, а оценивать текущую вероятность

безотказной работы детали или узла. Такой подход, определяемый как контроль по фактическому состоянию, позволяет выявлять предотказное состояние на ранней стадии, до того, как деградационные процессы приведут к аварийному отказу. В работах [12–14] показано, что применение методов нестационарной спектроскопии и фотоёмкостных измерений позволяет выявлять электрически активные дефекты в полупроводниковых компонентах, определяющих надёжность электронных систем управления.

1. Установлено, что эксплуатационная надёжность сельскохозяйственной техники в Российской Федерации остаётся на недостаточном уровне, что обусловлено износом парка, несовершенством системы ТОР и несоответствием практики нормативным требованиям ГОСТ 24925-81.

2. Показано, что переход от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию на основе непрерывного контроля текущей безотказности узлов является объективно назревшей необходимостью.

3. Для практической реализации указанного подхода требуется создание специализированной бортовой системы контроля и измерения надёжности, интегрированной в штатную систему управления трактором и способной в режиме реального времени предоставлять оператору информацию, достаточную для принятия обоснованных решений.

4. Решение этой комплексной научно-технической задачи должно стать одним из приоритетных направлений отраслевых исследований.

Список литературы

1. Никитченко С.Л., Воронов Е.В. Причинные факторы снижения эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники // Современные проблемы науки и образования. – 2024. – № 4. – С. 15–22.

2. Оценка потерь от простоя сельскохозяйственных машин по техническим причинам // Современные проблемы науки и образования. – 2024. – № 3. – С. 28–36.

3. Габитов И.И., Фаюршин А.Ф., Иофинов П.А., Зайнуллин Р.Х. Обеспечение эксплуатационной надёжности сельскохозяйственной техники с учётом региональных особенностей системы технического обслуживания и ремонта // Чтения академика В.Н. Болтинского: сборник статей. – М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 45–53.

4. ГОСТ 24925-81. Техническая диагностика. Тракторы. Приспособленность к диагностированию. Общие технические требования. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 20 с.

5. Shinde K. Prognostic Framework for Failure Analysis and Smart Farming // SAE Technical Paper 2025-28-0340. – 2025. – 3 p.

6. Карпиевич Ю.Д. Бортовой мониторинг технического состояния сцепления тракторов «Беларус» // Вестник БНТУ. – 2021. – № 2. – С. 34–41.

7. Management of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Digital Technologies // Russian Agricultural Sciences. – 2025. – Vol. 50, No. 6. – P. 786–791.

8. Цифровые технологии в обеспечении надёжности сельскохозяйственной техники: Материалы Международной научно-технической конференции. – М.: ФНАЦ ВИМ, 2023. – 320 с.

9. Левина Т.А., Шемякин А.В., Клочков Я.М., Адылина А.П., Кудряшова Д.А. Надёжность электронных систем, обеспечивающих нейронные связи искусственного интеллекта в сельскохозяйственном машиностроении // Вестник РГАТУ. – 2024. – Т.16, №3. – С. 141–150.

10. Клочков А.Я., Морозов А.С., Честных А.Р., Клочков Я.М., Кудряшова Д.А. Стандартизация и пути повышения надёжности полупроводниковой элементной базы машиностроения // СМиС-2024. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2024. – С. 36–41.

11. Клочков А.Я., Чернявский А.И., Клочков Я.М., Кудряшова Д.А. Совершенствование технологии и средств контроля сенсорных компонентов сельскохозяйственной техники // СМиС-2024. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2024. – С. 420–428.

12. Клочков А.Я., Клочкова Д.А., Клочков Я.М., Юдаев С.Н. Нестационарные фотоемкостные методы оценки электронных элементов автоматики // СМиС-2025. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2025. – С. 71–75.

13. Клочков А.Я., Клочкова Д.А., Клочков Я.М., Левина Т.А. Аттестация электронных дефектов материала нейросетевых устройств сельхозтехники // СМиС-2025. Технологии управления качеством: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – М.: Московский Политех, 2025. – С. 523–529.

14. Klochkova D.A., Levina T.A., Klochkov Y.M. Technical Aspects of Defect Calculation in Photonic Mechanical Engineering // Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2025). Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, 2025. – P. 695–710.

Колошеин Д.В.
к.т.н., доцент «Строительство инженерных сооружений и механика»
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
dkoloshein@mail.ru
Чернышов Р.В.
аспирант
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
jaga300@yandex.ru
Долгов И.О.
аспирант
ФГБОУ ВО РГАТУ
Россия, Рязань
sisim62@mail.ru

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В КАРТОФЕЛЕХРАНИЛИЩЕ С НАВАЛЬНЫМ ТИПОМ ХРАНЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты численного моделирования тепло- и массопереноса в картофелехранилище с навальным типом хранения. Рассмотрены особенности формирования температурного поля в объеме насыпи картофеля с учетом работы вентиляционной системы, пористости среды, внутреннего тепловыделения продукции и теплообмена через ограждающие конструкции. Показано, что температурный режим

хранилища имеет выраженную пространственную неоднородность: наиболее интенсивное охлаждение наблюдается в нижней зоне, прилегающей к вентиляционным воздуховодам, тогда как центральные и верхние участки характеризуются меньшей интенсивностью теплоотвода. Установлено, что распределение температуры связано со структурой воздушных потоков и зонами различной аэродинамической активности. Полученные результаты могут быть использованы для оценки зон риска при хранении картофеля и последующей оптимизации параметров вентиляции с целью выравнивания температурного режима.

Ключевые слова: картофелехранилище, картофель, численное моделирование, пористая среда, вентиляция, температурное поле, тепломассоперенос.

Koloshein D.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Structure Construction and Mechanics
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
dkoloshein@mail.ru
Chernyshov R.V.
Postgraduate Student
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
jaga300@yandex.ru
Dolgov I.O.
Postgraduate Student
FSBEI HE RGATU
Russia, Ryazan
sisim62@mail.ru

HEAT AND MASS TRANSFER IN A POTATO STORAGE FACILITY WITH BULK STORAGE

Abstract. The article presents the results of numerical modeling of heat and mass transfer in a potato storage facility with a bulk storage type. The features of the formation of a temperature field in the volume of a potato mound are considered, taking into account the operation of the ventilation system, the porosity of the medium, internal heat generation of products and heat exchange through enclosing structures. It is shown that the temperature regime of the storage has a pronounced spatial heterogeneity: the most intense cooling is observed in the lower zone adjacent to the ventilation ducts, while the central and upper sections are characterized by a lower intensity of heat dissipation. It is established that the temperature distribution is related to the structure of air flows and zones of different aerodynamic activity. The obtained results can be used to assess risk zones during potato storage and subsequent optimization of ventilation parameters in order to equalize the temperature regime.

Keywords: potato storage, potato, numerical modeling, porous medium, ventilation, temperature field, heat and mass transfer.

Картофель является одной из основных сельскохозяйственных культур, имеющих значительное продовольственное и хозяйственное значение [1-3]. После уборки качество и сохранность картофеля в значительной сте-

пени зависят от условий хранения, поскольку даже незначительные отклонения параметров среды могут приводить к усилению физиологических потерь и снижению товарных характеристик продукции. В этой связи особую актуальность приобретает исследование температурного режима в картофелехранилищах, определяющего эффективность хранения и требующего детального анализа процессов тепло- и массопереноса в объеме насыпи [3].

Температура в картофелехранилище определяет сохранность продукции. В условиях насыпи и сложной системы воздухораспределения температура по объему хранилища, как правило, неоднородна. Поэтому для анализа работы вентиляционной системы целесообразно использовать CFD-моделирование [3–5], позволяющее одновременно учитывать конвективный перенос теплоты, тепловыделение картофельной массы, сопротивление пористой среды и влияние наружных ограждений.

Цель исследования состоит в научной интерпретации результатов численного моделирования тепло- и массопереноса в картофелехранилище с навальным типом хранения картофеля, а также в выявлении пространственных причин неравномерности температурного режима при работе системы вентиляции.

Для достижения указанной цели решаются следующие задачи:

1. уточнить расчетную схему хранилища и физический смысл принятых допущений;

2. проанализировать структуру температурного поля в продольных и поперечных сечениях насыпи;

3. оценить влияние скоростного поля на формирование зон воздухообмена в насыпи картофеля;

4. сопоставить распределение температуры с характером влагосодержания воздуха;

5. выделить зоны риска и сформулировать направления повышения равномерности вентиляционного режима.

Объект моделирования представляет собой картофелехранилище с навальным типом хранения. Геометрическая модель включает объем насыпи, систему вентиляционных воздуховодов, входные коллекторы и выпускной канал.

Расчетная схема и физическая модель

Насыпь картофеля разделена по высоте на три слоя с различной пористостью, что отражает изменение структуры насыпи и гидравлического сопротивления по вертикали. Воздушная среда рассматривалась как вязкая несжимаемая при нормальном давлении. Для описания турбулентности использована модель k-omega SST, а для пористой части заданы параметры вязкостного и инерционного сопротивления. Такой выбор модели уместен для задач, где течение одновременно включает относительно свободные участки в каналах и фильтрационное прохождение через объем с большим

сопротивлением. Расчет включает наружный теплообмен через ограждающие поверхности, внутреннее тепловыделение клубней, поступление охлажденного воздуха и свободное истечение через выходной канал [6, 7]. В статье эти параметры не выносятся как перечень «основных условий», поскольку для научного анализа важнее их системная роль: наружная среда формирует тепловой сток, картофельная масса является распределенным источником тепла и влаги, а вентиляционная система задает не только общий расход, но и пространственную структуру переноса.

Результаты исследования

По результатам CFD-моделирования [8–10] температурное поле внутри картофелехранилища представлено диапазоном примерно от -3 до +2 °C. Основная часть расчетной области находится в интервале около 0...2 °C, тогда как локальные минимумы наблюдаются в нижней части объема, у вентиляционных элементов и вблизи наружных ограждений.

Горизонтальное сечение показывает, что центральные зоны и удаленные от интенсивно продуваемых участков области остаются более теплыми. Вертикальное сечение по центру хранилища демонстрирует выраженный температурный градиент по высоте: нижняя часть охлаждается интенсивнее, чем средняя и верхняя, что обусловлено непосредственным влиянием вентиляционных воздуховодов.

Результаты по скоростям потока и линиям тока показывают прямую связь аэродинамической структуры течения с температурным режимом. В основной массе насыпи скорость фильтрации составляет порядка 0,02–0,20 м/с, в слабо продуваемых областях снижается до 0,00–0,04 м/с, а локально у вентиляционных элементов может достигать 0,8–1,0 м/с. Следовательно, участки с пониженной скоростью потока совпадают с зонами более высокого локального нагрева.

Рисунок 1 обобщает диапазоны температур, выделенные по результатам анализа температурных полей в насыпи картофеля. Наиболее холодные области формируются в нижней зоне у воздуховодов и в периферийных участках у наружных ограждений, тогда как основная масса продукции и особенно центральные участки объема характеризуются более высокими температурами. Такой результат подтверждает пространственную неоднородность охлаждения и показывает, что локальный температурный режим определяется удаленностью зоны от наиболее интенсивно продуваемых участков.

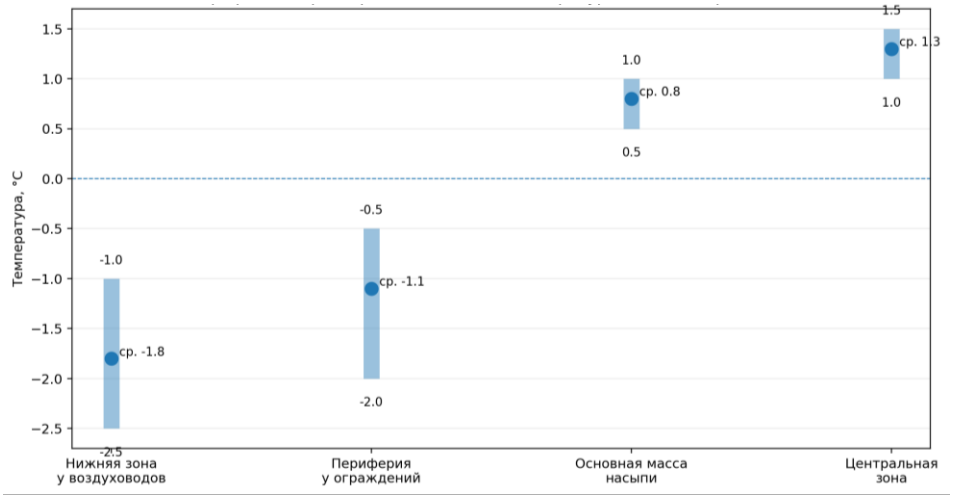


Рис. 1. Диапазоны температуры по зонам картофелехранилища

Анализ рисунка 2 показывает, что по мере перехода от нижнего слоя к верхнему слою температура возрастает. Несмотря на рост пористости верхних слоев, решающее влияние на охлаждение оказывает расположение вентиляционных воздуховодов в нижней зоне, поэтому именно нижний слой охлаждается наиболее интенсивно.

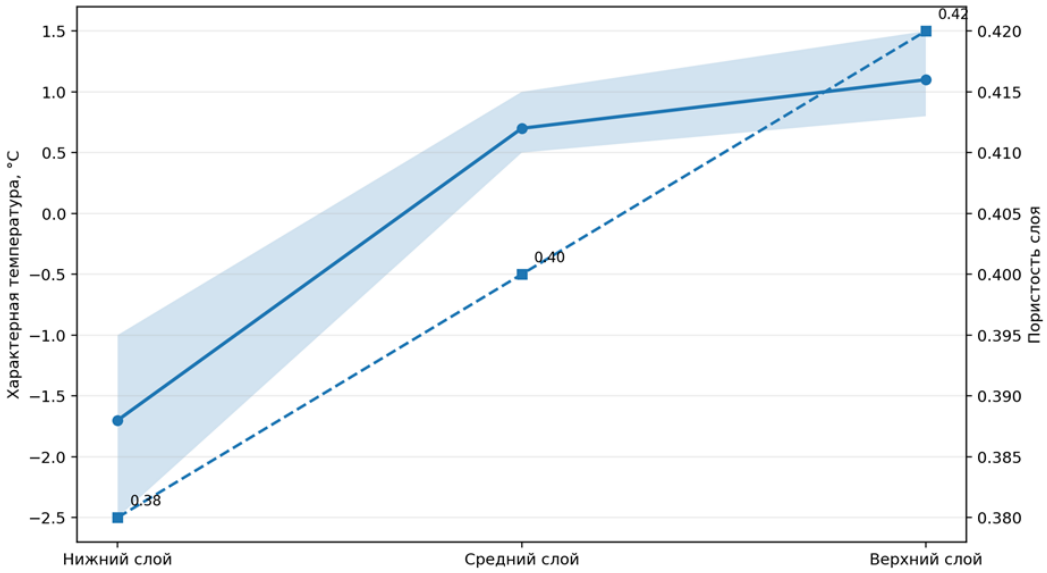


Рис. 2. Изменение температуры по высоте насыпи с учетом пористости слоев насыпи

Рисунок 3 показывает, как меняется аэродинамическая активность потока при его движении от входного коллектора через нижние воздуховоды и толщу насыпи к выходной зоне. Максимальный охлаждающий эффект наблюдается на стадии прохождения воздуха через нижнюю часть насыпи, где поток непосредственно взаимодействует с наиболее холодными участками. В центральной части объема интенсивность движения снижается, что соответствует уменьшению теплоотвода и повышению локальной температуры.

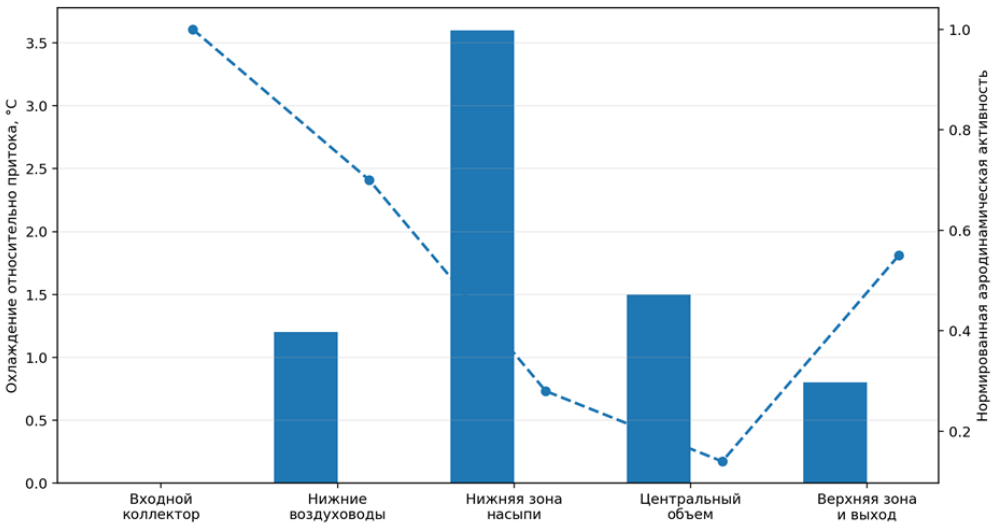


Рис. 3. Изменение охлаждения и аэродинамической активности вдоль характерной линии тока

Построенные графики подтверждают, что температурное поле внутри картофелехранилища формируется в результате совместного влияния приточного воздуха с определенной температурой, теплообмена с наружной средой при температуре -4,4 °С и внутреннего тепловыделения картофельной массы 4,31 Вт/м^3. При этом решающим фактором пространственной неоднородности выступает структура воздушного потока.

Рост пористости снизу вверх сам по себе не приводит к выравниванию температуры, поскольку расположение воздуховодов в нижней части хранилища создает преимущественный путь движения воздуха именно в нижней зоне. Поэтому нижний слой получает наибольший охлаждающий эффект, а центральные и верхние участки объема испытывают менее интенсивный теплоотвод.

С инженерной точки зрения, полученные зависимости указывают на необходимость выравнивания потоков [10, 11]. Для этого возможно использовать перераспределение расхода между воздуховодами, корректировка конфигурации воздуховодов либо режимов работы вентиляции с учетом зон, где по данным моделирования фиксируется низкая скорость потока.

По результатам исследования установлено, что в объеме картофелехранилища формируется пространственно неоднородное температурное поле с варьированием температуры от −3 до +2 °С, при этом преобладающая часть продукции находится в диапазоне температур до +2 °С. Выявленная температурная неоднородность свидетельствует о неравномерности тепло- и массообменных процессов в объеме насыпи и может рассматриваться как фактор, влияющий на условия хранения. Полученные данные представляют научно-практический интерес и могут служить основой для последующей оптимизации параметров вентиляционной системы картофелехранилища с целью снижения температурных градиентов и локальных отклонений от регламентированного режима хранения.

Список литературы

1. Технологический и биологический аспекты эффективной утилизации соломы / И. Ю. Богданчиков, А. В. Юдина, А. Н. Бачурин, Ю. А. Богданчиков // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства, Рязань, 09–10 декабря 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, 2026. – С. 338–342. – EDN XUQQHE.

2. Колошеин, Д.В. Снижение потерь картофеля и энергопотребления системы вентиляции картофелехранилища совершенствованием воздуховода дисс.. к.т.н./Д.В. Колошеин – Рязань, 2017. – 132 с.

3. Калашников, М.П. Совершенствование систем обеспечения микроклимата в зданиях картофелехранилищ // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 54–63. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.05.

4. Расчет тепловлагообмена в слое сочной сельскохозяйственной продукции / А.М. Моисеенко, Ю.А. Кузнецов, И.Н. Кравченко и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 6 (106). – С. 64–70.

5. Аналитическое исследование взаимосвязи условий хранения семенного картофеля в картофелехранилищах с последующей предпосадочной обработкой / Д. В. Колошеин, С. Н. Борычев, А. С. Попов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2024. – Т. 16, № 4. – С. 93–99. – DOI 10.36508/RSATU.2024.23.75.014. – EDN HPCURG.

6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

7. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие для вузов : в 10 т. Том 6. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского. – 6-е изд., испр. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 728 с. – ISBN 978-5-9221-1625-1. – Текст: электронный. – URL: https://znanium.com/catalog/product/1223539 (дата обращения: 17.04.2026).

8. Кобылкин С.С., Кобылкин А.С., Сис М., Альфа М.Б. Моделирование в ANSYS CFD процесса проветривания карьеров // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 102–106.

9. Daniel, Leo & Jakhar, Sanjeev & Dasgupta, Mani Sankar. (2024). Optimizing cold storage for uniform airflow and temperature distribution in apple preservation using CFD simulation. Scientific Reports. 14. 10.1038/s41598-024-76385-y.

10. Zhen Q, Xu C, Tana, Wang H, Yue X, Yan C and Sun Y (2025) Research on the temperature and humidity distribution characteristics in potato storage facilities: experimental analysis and numerical simulation. Front. Sustain. Food Syst. 9:1594791. doi: 10.3389/fsufs.2025.1594791.

11. Новый взгляд на организацию автоматического управления микроклиматом при хранении семенного картофеля / Алиев М.Г., Пачкин С.Г., Иванов П.П. и др. // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 11–2. – С. 237–242.

Пилип Л.В.
к.в.н., доцент зоогигиены, физиологии и биохимии
Вятский государственный агротехнологический университет
Россия, Киров
pilip_larisa@mail.ru
Сырчина Н.В.
старший научный сотрудник
Вятский государственный университет
Россия, Киров
nvms1956@mail.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ *ESCHERICHIA COLI* К ПОДКИСЛЕНИЮ И ГИПОХЛОРИТУ НАТРИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НАВОЗНЫХ СТОКОВ

Аннотация. Жидкая фракция навозных стоков свиноводческих комплексов является значимым источником биологического загрязнения окружающей среды, включая бактерии группы кишечной палочки и гены антибиотикорезистентности. Цель работы – оценить влияние химической обработки жидкой фракции бесподстилочного свиного навоза на численность *Escherichia coli*. Образцы жидкой фракции (влажность 99,1%, pH 6,8 ед. pH) обрабатывали 10% раствором серной кислоты (до pH 5,3±0,2) и раствором гипохлорита натрия (1 мл/л, 5% активного хлора). Контролем служила необработанная жидкая фракция. Экспозиция составила 7 суток при 20±2°C. Микробиологический анализ включал посев на среду Эндо, микроскопию и биохимическую идентификацию. Установлено, что исходная численность E. Coli в контроле составляла $(4,0\pm0,8)\times10^6$ КОЕ/мл. Обработка серной кислотой и гипохлоритом натрия достоверно ($P>0,95$) снижала количество микроорганизмов до $(7,0\pm0,7)\times10^4$ и $(7,0\pm1,0)\times10^4$ КОЕ/мл соответственно, то есть на два порядка. Полной элиминации E. coli не достигнуто ни в одном варианте. E. coli проявляет высокую устойчивость к подкислению и окислительному стрессу в условиях органически насыщенной среды навозных стоков. Используемые приемы могут использоваться как предварительная обработка. Для полной санации требуется комбинирование методов или повышение концентраций реагентов.

Ключевые слова: колиформные бактерии, кишечная палочка, навозные стоки, запах, серная кислота, гипохлорит натрия.

Pilip L.V.
Candidate of Veterinary Sciences, Associate Professor
of the Department of Zoohygiene, Physiology, and Biochemistry
Vyatka State Agrotechnological University
Russia, Kirov
pilip_larisa@mail.ru
Syrchina N.V.
Senior Researcher
Vyatka State University
Russia, Kirov
nvms1956@mail.ru

RESISTANCE OF *ESCHERICHIA COLI* TO SODIUM ACIDIFICATION AND HYPOCHLORITE DURING TREATMENT OF MANURE EFFLUENTS

Abstract. The liquid fraction of dung runoff from pig-breeding complexes is a significant source of biological environmental pollution, including E. coli bacteria and antibiotic resistance genes. The purpose of the work is to evaluate the impact of chemical treatment of the liquid fraction of lineless pig manure on the number of Escherichia coli. Liquid fraction samples (99.1% humidity, pH 6.8) were treated with 10% sulfuric acid solution (to pH 5.3 ± 0.2) and sodium hypochlorite solution (1 mL/L, 5% active chlorine). The control was the untreated liquid fraction. The exposure was 7 days at 20 ± 2 °C. Microbiological analysis included inoculation on Endo medium, microscopy and biochemical identification. The baseline E. Coli count in the control was found to be (4.0 ± 0.8) × 10 ⁶ CFU/ml. Treatment with sulfuric acid and sodium hypochlorite significantly (P> 0.95) reduced the number of microorganisms to (7.0 ± 0.7) × 10 ⁴ and (7.0 ± 1.0) × 10 ⁴ CFU/mL, respectively, i.e. by two orders of magnitude. Complete elimination of E. coli was not achieved in either variant. E. coli exhibits high resistance to acidification and oxidative stress in an organically saturated manure effluent environment. The techniques used can be used as pretreatment. Complete sanitization requires a combination of methods or an increase in reagent concentrations.

Keywords: coliform bacteria, E. coli, manure, odor, sulfuric acid, sodium hypochlorite.

Промышленное свиноводство характеризуется образованием значительных объемов навозных стоков, которые при отсутствии эффективной обработки могут служить источником запахового загрязнения воздуха [8], химической деградации пахотных земель [9] и их микробного загрязнения [1, 4]. Индикатором фекального загрязнения окружающей среды являются бактерии группы кишечной палочки [10–12].

Escherichia coli населяет дистальные отделы кишечного тракта человека и теплокровных животных. Подавляющее большинство ее штаммов безопасно, однако отдельные серотипы способны вызывать тяжелые кишечные инфекции и системные поражения [13]. Кроме того, *E. coli* активно участвует в процессах аммонификации, сопровождающихся выделением токсичных метаболитов разложения органики [3]. Разработка и внедрение экономически оправданных методов обработки навозных стоков, обеспечивающих снижение численности колиформных бактерий, представляет собой важную практическую задачу [2, 5, 7].

Цель исследования – оценить эффективность химических способов воздействия на жидкую фракцию бесподстилочного свиного навоза в отношении сокращения популяции *E. coli*.

Для достижения цели сравнивали микробную нагрузку (КОЕ/мл) в контрольных образцах жидкой фракции и в образцах, обработанных реагентами в дозировках, рекомендованных как технически реализуемые (исключающих коррозию оборудования и резкое удорожание технологии).

Методология. Отбор образцов жидкой фракции осуществляли в стерильную тару на крупном свиноводческом комплексе Кировской области сразу после сепарации навозных стоков. Доставленные в лабораторию

пробы анализировали по физико-химическим и микробиологическим показателям. Навески жидкой фракции объемом 2 л помещали в стерильные пятилитровые контейнеры, добавляли реагенты и герметично закрывали крышками с газоотводными трубками. В опыте 1 проводили подкисление до pH 5,3±0,2 10% раствором H2SO4. В опыте 2 вносили раствор NaOCl (содержит 5% активного хлора) из расчета 1 мл/л. Контролем служила жидкая фракция без каких-либо добавок. В течение 7 суток образцы хранили в темном месте при 20±2°С.

Микробиологический анализ включал высев на дифференциально-диагностическую среду Эндо, последующую микроскопию фиксированных и окрашенных по Граму препаратов, а также биохимическую идентификацию с использованием тест-системы «ЭНТЕРОтест 24» (Чехия). Все эксперименты выполняли в трехкратной повторности. Статистическую обработку данных проводили стандартными методами с применением пакета Microsoft Excel.

Результаты исследования. Влажность исходных навозных стоков контроля составляла 99,1%, pH – 6,8 ед. pH. Результаты эксперимента придставлены в таблице.

Таблица

Влияние добавок на численность *E. coli* в жидкой фракции навозных стоков

Варианты эксперимента	Количество *E. coli*, КОЕ/мл
Контроль	$(4,0\pm0,8)\cdot10^6$
Опыт 1	$(7,0\pm0,7)\cdot10^{4*}$
Опыт 2	$(7,0\pm1,0)\cdot10^{4*}$

* выделены варианты опыта, достоверно (P > 0,95) отличающиеся от контроля.

В ходе микробиологического анализа образцов жидкой фракции навозных стоков, отобранных на свиноводческом предприятии Кировской области, установлено, что исходная численность *E. coli* в контрольном варианте (без внесения добавок) составляла $(4,0\pm0,8)\times10^6$ КОЕ/мл. При посеве на среду Эндо у всех образцов наблюдался характерный для *E. coli* рост колоний металлического блеска с темно-красным центром. Микроскопия препаратов, окрашенных по Грамму, выявила грамотрицательные палочки типичной морфологии, а биохимическое тестирование (ЭНТЕРОтест 24) подтвердило принадлежность выделенных культур к виду *E. coli* (образование индола, ферментация глюкозы и лактозы с образованием кислоты и газа, отсутствие оксидазы).

После обработки жидкой фракции растворами серной кислоты (H_2SO_4) и гипохлорита натрия (NaOCl) наблюдали статистически значимое (P > 0,95) снижение количества искомых микроорганизмов по сравнению с контролем. В варианте с подкислением до pH 5,3±0,2 численность *E. Coli* уменьшилась до $(7,0\pm0,7)\times10^4$ КОЕ/мл, а при внесении NaOCl (1 мл/л 5%-

ного раствора, что соответствует 0,005% активного хлора) – до $(7,0\pm1,0)\times10^4$ КОЕ/мл.

Оба испытанных реагента обеспечили сопоставимый эффект: снижение содержания *E. coli* в жидкой фракции приблизительно в 57 раз (на 2 порядка) относительно контроля. Различия между вариантами H2SO4 и NaOCl не превышали ошибки эксперимента и не являлись статистически достоверными ($P < 0,95$), что свидетельствует о сходной эффективности этих двух химических методов в принятых дозировках. Ни один из реагентов не привел к полной инактивации *E. coli*, а достигнутое снижение не обеспечило абсолютной санации жидкой фракции согласно действующим ветеринарно-санитарным требованиям (полное отсутствие колиформных в 1 мл не достигается).

Повышение концентрации H_2SO_4 или NaOCl до значений, гарантирующих полную инактивацию *E. coli* (снижение на 5–6 порядков), приведет к росту затрат и коррозии оборудования [2, 6], а также потере питательной ценности стоков как удобрения. Таким образом, оптимизация технологического регламента должна базироваться на компромиссе между степенью санации и экономической приемлемостью.

Выводы. Кишечная палочка проявляет высокую устойчивость к действию химических препаратов, используемых для обезвреживания и устранения запаха навозных стоков. Внесение в жидкую фракцию растворов H2SO4 (до pH 5,0–5,5) и NaOCl (до 0,005% по активному хлору) приводит к снижению количества *E. coli* на 2 порядка.

Использованные химические методы не обеспечивают исчезновение *E. coli* из жидкой фракции навозных стоков, но снижают ее численность. Для достижения более глубокой санации требуются либо увеличение концентрации реагентов, что экономически и технологически ограничено, либо комбинирование химической обработки с другими методами (например, термическими).

Список литературы

1. Биологическое загрязнение пахотных земель отходами свиноводства / Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, В. А. Козвонин, Е. П. Колеватых, Т. Я. Ашихмина, А. В. Сазанов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 199–205. doi 10.25750/1995-4301-2022-3-199-205

2. Влияние подкисления навозных стоков на их микробиологические характеристики / Л. В. Пилип, В. А. Козвонин, Н. В. Сырчина, Е. П. Колеватых, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 161–167. doi 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167

3. Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Роль аммонификаторов в эмиссии аммиака из свиных навозных стоков // Известия КГТУ. 2023. № 68. С. 46–54.

4. Пилип Л. В., Сырчина Н. В. Экологическая проблема отрасли свиноводства // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции. В 2-х книгах. 2019. С. 193–196.

5. Рациональная утилизация отработанной серной кислоты, образующейся при производстве хлора / Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина, Н. Н. Богатырева // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 143–148.

6. Семенова И. В., Мишутова М. В. Бактерицидно-химические свойства хлорсодержащих дезинфектантов, применяемых при очистке сточных вод // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. №. 3. С. 42–46.

7. Сырчина Н. В., Пилип Л. В. Влияние подкисления на эмиссию сероводорода в органических отходах свинокомплексов // Проблемы региональной экологии. 2021. № 4. С. 102–106.

8. Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 26–34. doi 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034

9. Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 219–225. doi 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225

10. Терехов В. И., Сердюченко И. В. Бактерии рода Escherichia (Аналитический обзор) // Вестник ветеринарии. 2016. № 2(77). С. 35–42.

11. Трансформация микробиоты отходов животноводства под влиянием химических реагентов для устранения запаха / Е. П. Колеватых, Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, В. А. Козвонин, Т. Я. Ашихмина // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 159–165. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165

12. Antibacterial activity of surfactants against Escherichia coli cells is influenced by carbon source and anaerobiosis / S. Ishikawa, Y. Matsumura, K. Katoh-Kubo, T. Tsuchido // Journal of Applied Microbiology. 2002. Vol. 93. №. 2. P. 302–309.

13. Kaper J. B., Nataro J. P., Mobley H. L. T. Pathogenic Escherichia coli // Nature reviews microbiology. 2004. Vol. 2. №. 2. P. 123–140.

Береснев В.А.
студент
ФГБОУ ВО Уральский ГАУ
Россия, Екатеринбург
mii@urgau.ru
Бабкина А.А.
старший преподаватель кафедры математики и ИИТ
ФГБОУ ВО Уральский ГАУ
Россия, Екатеринбург
mii@urgau.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ АГРОПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Аннотация. В статье рассматриваются конкретные направления применения алгоритмов машинного обучения, компьютерного зрения и систем поддержки принятия решений в аграрном секторе. Показано, как цифровые инструменты меняют подход к прогнозированию урожайности, уходу за посевами, организации животноводства и сбыту продукции. Отдельно рассмотрены барьеры, которые замедляют цифровую трансформацию российского сельского хозяйства.

Ключевые слова: искусственный интеллект, АПК, машинное обучение, точное земледелие, цифровизация, нейронные сети.

Beresnev V.A.
student
FSBEI HE «Ural State Agrarian University»
Russia, Yekaterinburg
mii@urgau.ru
Babkina A.A.
Senior Lecturer, Department of Mathematics and IIT
FSBEI HE «Ural State Agrarian University»
Russia, Yekaterinburg
mii@urgau.ru

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX MANAGEMENT

Abstract. The article discusses specific applications of machine learning algorithms, computer vision and decision support systems in the agricultural sector. It shows how digital tools are changing approaches to yield forecasting, crop management, livestock farming and product marketing. Barriers slowing down the digital transformation of Russian agriculture are examined separately.

Keywords: artificial intelligence, agro-industrial complex, machine learning, precision farming, digitalization, neural networks.

В данной статье рассматривается профиль обучения «Интеллектуальные информационно-измерительные системы», его учебный план. В практической части проводится анализ профиля обучения по классическому методу SWOT с выработкой SWOT-стратегий, основанных на пересечении полей матрицы.

Современное инженерное образование сталкивается с необходимостью адаптации к стремительно развивающимся требованиям индустрии и цифровой трансформации. Технологии, применяющиеся в IT-индустрии, быстро устаревают и требуют постоянного обновления. Так, например, согласно данным Службы исследований hh.ru за 2023 год, 75% абитуриентов при выборе будущего университета обращают внимание на наличие факультета или программы по выбранной специальности, 39% – на наличие интересных предметов в учебной программе. Именно выпускники инженерных и IT-специальностей чаще всего работают по специальности своего обучения, а значит, учебные планы именно этих профилей должны отвечать всем вызовам современности и готовить максимально приспособленные к условиям рынка кадры. Для этих задач часто проводится SWOT-анализ и другие методы стратегического анализа.

В ходе выполнения практической части статьи необходимо, используя методику SWOT-анализа, изучить учебный план и дополнительную инфор-

мацию по профилю обучения Интеллектуальные информационно-измерительные системы направления Информационные системы и технологии Московского политехнического университета, и на основе этих данных разработать SWOT-стратегии, изучить слабые и сильные места профиля обучения и предложить пути улучшения.

SWOT-анализ – это стратегический инструмент, позволяющий оценить текущее состояние объекта (образовательной программы) с точки зрения внутренних (сильные и слабые стороны) и внешних (возможности и угрозы) факторов. Такой подход помогает принимать обоснованные решения, разрабатывать стратегии и корректировать направления развития.

SWOT-анализ принято проводить в два этапа. На первом участниками анализа заполняется таблица из 4 полей, в которой выделяются сильные стороны (Strengths) проекта, слабые стороны (Weaknesses), а также внешние факторы: возможности для развития (Opportunities) и угрозы роста (Threats).

На втором этапе SWOT-анализа составляется матрица решений. Для этого необходимо сопоставить каждый внутренний фактор с каждым внешним фактором, получив 4 варианта комбинаций: S + O (сильные стороны + возможности.), W + O (слабые стороны + возможности), S + T (сильные стороны + угрозы), W + T (слабые стороны + угрозы)

Для выделения внутренних и внешних факторов мною были изучены учебный план профиля Интеллектуальные информационно-измерительные системы и других профилей направления Информационные системы и технологии, данные о профилях на сайте университета, а также передовые практики, реализуемые в других университетах.

Прогнозирование урожайности и планирование в растениеводстве

Точно предсказать урожай – задача, с которой агрономы борются веками. Погода, болезни, состав почвы, сорт культуры – слишком много переменных одновременно. Традиционные расчёты по историческим таблицам дают ошибку в 20–30%. Алгоритмы машинного обучения снижают её до 5–10%, потому что анализируют сразу все факторы вместе [3].

Особенно хорошо себя показали рекуррентные сети LSTM – они умеют работать с временными рядами: данными за прошлые сезоны, динамикой осадков, температурными аномалиями. На их основе строятся прогнозы на несколько месяцев вперёд. Дополняют картину генеративные сети GAN: они моделируют сценарии распространения болезней и помогают агрономам заранее выстраивать защиту.

Когда прогностическая модель встроена в систему поддержки решений, она сразу выдаёт конкретные рекомендации – когда сеять, сколько удобрений вносить, какой сорт выбрать для конкретного поля. Хозяйства, использующие такие системы, отмечают снижение расхода агрохимикатов при сохранении урожайности [4].

Компьютерное зрение и автоматизация полевых работ

Точное земледелие основано на простой идее: разные участки поля требуют разного подхода. Почва неоднородна, болезни распространяются очагами, сорняки растут неравномерно. Системы компьютерного зрения на базе свёрточных нейронных сетей (CNN) умеют видеть эту неоднородность – распознают патогены, вредителей и сорную растительность на снимках с дронов или камер на тракторе [5].

Беспилотники с мультиспектральными камерами облетают поля и в реальном времени строят карты вегетационного индекса NDVI. По этим картам опрыскиватель точечно обрабатывает только те участки, где это нужно. Результат – расход химических средств снижается на 30–40% при том же качестве урожая [6].

Параллельно появляется автономная техника. Роботизированные тракторы с интеграцией ГЛОНАСС и бортового ИИ пашут, сеют и убирают без оператора круглые сутки. Точность прохода повышается, перекрытие полос сводится к минимуму, зависимость от дефицита механизаторов снижается.

Цифровые технологии в животноводстве

В животноводстве ИИ решает задачи, которые раньше требовали постоянного присутствия ветеринара или зоотехника. Видеокамеры и носимые датчики на животных фиксируют двигательную активность, пищевое поведение и физиологические параметры. Алгоритмы анализируют эти данные и сигнализируют о первых признаках болезни, хромоты или охоты – за несколько дней до того, как симптомы станут очевидными [7].

Кормовые станции с RFID-считывателями формируют индивидуальный рацион для каждого животного с учётом надоя, живой массы и стадии лактации. Доильные роботы сами определяют, когда корова готова к доению, и в процессе анализируют состав молока. Всё это снижает долю ручного труда и позволяет одному оператору обслуживать значительно большее поголовье.

В птицеводстве и свиноводстве нейросети управляют микроклиматом – вентиляцией, обогревом, освещением – в зависимости от состояния поголовья. Это снижает конверсию корма и уменьшает риск падежа от стресса. По отраслевым оценкам, комплексное внедрение таких решений повышает рентабельность производства на 15–25% [8].

Логистика и сбыт: как ИИ помогает продавать

Вырастить урожай – половина дела. Не менее важно вовремя его продать по справедливой цене. Алгоритмы машинного обучения анализируют биржевые котировки, данные о потребительском спросе и остатках на складах, предлагая оптимальный момент для реализации партии. Это особенно ценно для фермеров, у которых нет доступа к профессиональным аналитикам рынка [9].

На послеуборочном этапе компьютерное зрение автоматизирует сортировку. Нейросетевые классификаторы разделяют продукцию на товарные категории, выявляют дефекты и посторонние включения быстрее и точнее,

чем операторы вручную. Однородность партии растёт, количество рекламаций снижается.

Перспективная связка – блокчейн плюс ИИ. Каждая партия получает цифровой паспорт, в котором зафиксирована история: поле, дата уборки, параметры хранения, результаты лабораторных тестов. Крупные ретейлеры и экспортные покупатели всё чаще требуют именно такую прослеживаемость.

Что мешает широкому внедрению ИИ в российском АПК.

Несмотря на очевидные результаты, большинство российских хозяйств пока не используют эти технологии. Причин несколько:

- слабый интернет и нестабильное электроснабжение во многих сельских районах делают облачные сервисы ненадёжными;
- острая нехватка специалистов, которые одновременно понимают агрономию и умеют работать с данными;
- высокая стоимость оборудования – дроны, датчики, серверы – недоступна для малых фермерских хозяйств;
- отсутствие единых стандартов для агрономических данных мешает создавать универсальные модели;
- недоверие части аграриев к автоматическим рекомендациям, особенно среди старшего поколения [10].

Государство может ускорить процесс через субсидирование цифрового оборудования, создание открытых баз агрономических данных и включение соответствующих дисциплин в программы аграрных вузов. Отечественным IT-компаниям есть смысл разрабатывать решения под российский климат и юридическую среду – зарубежные платформы закрывают лишь часть потребностей.

Искусственный интеллект уже не абстрактная перспектива для АПК – это рабочий инструмент, который конкретные хозяйства используют каждый день. Он снижает потери, экономит ресурсы и помогает принимать более точные решения. Российский агросектор обладает для этого всеми предпосылками: огромными площадями, богатой природной базой и растущим интересом со стороны бизнеса.

Дальнейшие исследования стоит направить на адаптацию нейросетевых моделей к конкретным климатическим зонам страны, разработку методик оценки экономической отдачи от цифровизации и создание национального стандарта агрономических данных.

Список литературы

1. Алтухов А. И., Дудин М. Н. Цифровая трансформация как технологический прорыв и переход на новый уровень развития агропромышленного сектора России / А. И. Алтухов, М. Н. Дудин // Продовольственная политика и безопасность. – 2020. – № 2. – С. 81–96.

2. Леушкина В. В. Цифровизация агропромышленного комплекса: основной элемент повышения конкурентоспособного инновационного развития / В. В. Леушкина // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 2143–2160.

3. Аббас Ф. [и др.] Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур с использованием проксимальных датчиков и алгоритмов машинного обучения / Ф. Аббас [и др.] // Агрономия. – 2020. – Т. 10, № 7. – С. 1046.

4. Лиакос К. Г. [и др.] Машинное обучение в сельском хозяйстве: обзор / К. Г. Лиакос [и др.] // Сенсоры. – 2018. – Т. 18, № 8. – С. 2674.

5. Камиларис А., Пренафета-Болду Ф. Х. Глубокое обучение в сельском хозяйстве: обзор / А. Камиларис, Ф. Х. Пренафета-Болду // Компьютеры и электроника в сельском хозяйстве. – 2018. – Т. 147. – С. 70–90.

6. Чжан С., Ковач Дж. М. Применение малых беспилотных авиационных систем в точном земледелии: обзор / С. Чжан, Дж. М. Ковач // Точное земледелие. – 2012. – Т. 13, № 6. – С. 693–712.

7. Нитираджан С., Кемп Б. Цифровое животноводство / С. Нитираджан, Б. Кемп // Исследования в области сенсорики и биосенсорики. – 2021. – Т. 32. – С. 100408.

8. Фазылова С. С., Яркова Т. М. Цифровизация в сельском хозяйстве региона как инструмент развития / С. С. Фазылова, Т. М. Яркова // Креативная экономика. – 2020. – Т. 14, № 8. – С. 1655–1672.

9. Айтпаева А. А. Цифровизация сельского хозяйства в контексте повышения конкурентоспособности отечественного агропромышленного комплекса / А. А. Айтпаева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2019. – № 3. – С. 56–63.

10. Министерство сельского хозяйства РФ. Государственная программа «Цифровое сельское хозяйство» // Официальный сайт Минсельхоза России. – URL: https://mcx.gov.ru (дата обращения: 15.03.2025).

СЕКЦИЯ 6
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Меньшиков А.Д.
заместитель генерального директора
ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест»
Россия, Москва
alexdm@rostest.ru
Сычик В.С.
технический директор
ООО «ЮНИТЕСС»
Россия, Москва
vs@unitess.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ФБУ «НИЦ ПМ – РОСТЕСТ»

Аннотация. В статье рассматривается опыт внедрения системы UNITESS в ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест» для автоматизации процессов поверки и калибровки средств измерений. Актуальность работы обусловлена ростом объёмов метрологических работ и необходимостью повышения производительности лабораторий при сохранении достоверности и воспроизводимости результатов. Рассмотрены основные элементы цифровой экосистемы UNITESS, включая UNITESS APM, систему управления «Метрология 4.0», базу данных UNITESS DB и аналитический модуль UNITESS Dashboard. Особое внимание уделено разработке скриптов автоматизации, представляющих собой цифровую реализацию методик поверки, а также оценке покрытия наиболее востребованных типов средств измерений автоматизированными сценариями. В работе приведены данные о количестве разработанных скриптов, уровне автоматизации по лабораториям и влиянии автоматизированных рабочих мест на снижение трудоёмкости поверочных процедур. Отдельно рассмотрены возможности массового формирования документов, передачи сведений в ФГИС «АРШИН», контроля загрузки персонала и анализа производственных показателей. Показано, что внедрение автоматизации позволяет сократить время выполнения операций, снизить влияние человеческого фактора, повысить качество оформления результатов и обеспечить более прозрачное управление лабораторными процессами. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейшем развитии цифровых решений для метрологических лабораторий.

Ключевые слова: Автоматизация поверки; калибровка средств измерений; UNITESS APM; Метрология 4.0; цифровизация метрологических процессов; автоматизированное рабочее место; скрипты автоматизации; снижение трудоёмкости; ФГИС «АРШИН»; метрологическая прослеживаемость; повышение производительности лаборатории.

Menshikov A.D.
Deputy General Director
FBU «SIC PM – Rostest»
Russia, Moscow
alexdm@rostest.ru
Sychik V.S.
Technical Director

LLC «UNITESS»
Russia, Moscow
vs@unitess.ru

AUTOMATION OF VERIFICATION AND CALIBRATION PROCESSES FOR MEASURING INSTRUMENTS AT FBU SIC PM – ROSTEST

Abstract. The article discusses the experience of implementing the UNITESS system at FBU «SIC PM – Rostest» for automating the verification and calibration of measuring instruments. The relevance of the work stems from the growing volume of metrological work and the need to improve laboratory productivity while maintaining the reliability and reproducibility of results. The main elements of the UNITESS digital ecosystem are considered, including UNITESS APM, the «Metrology 4.0» management system, the UNITESS DB database, and the UNITESS Dashboard analytical module. Particular attention is paid to the development of automation scripts implementing verification procedures digitally, as well as to assessing the automated-scenario coverage of the most in-demand types of measuring instruments. The article presents data on the number of scripts developed, the level of automation across laboratories, and the effect of automated workstations on reducing the labour intensity of verification procedures. The possibilities of bulk document generation, data transfer to the FGIS «ARSHIN» system, workload monitoring, and analysis of production indicators are considered separately. It is shown that automation reduces operation time, lowers the influence of the human factor, improves the quality of result documentation, and enables more transparent management of laboratory processes. The results obtained can be used for the further development of digital solutions for metrological laboratories.

Keywords: Verification automation; calibration of measuring instruments; UNITESS APM; Metrology 4.0; digitalization of metrological processes; automated workstation; automation scripts; reduced labour intensity; FGIS «ARSHIN»; metrological traceability; laboratory productivity improvement.

В условиях постоянного роста объёмов метрологических работ особую значимость приобретает повышение эффективности процессов поверки и калибровки средств измерений. Традиционный подход, основанный на ручном выполнении операций, требует значительных временных затрат, повышает нагрузку на персонал и увеличивает риск возникновения ошибок при обработке результатов и оформлении документации.

Одним из перспективных направлений развития метрологических лабораторий является внедрение программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих автоматическое или полуавтоматическое выполнение операций поверки и калибровки. Такие решения позволяют формализовать методики, сократить влияние человеческого фактора, повысить воспроизводимость измерительных процедур и обеспечить единый подход к оформлению результатов.

Настоящая работа посвящена рассмотрению опыта внедрения системы UNITESS в ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест». В работе анализируются структура автоматизированных рабочих мест, объём разработанных скриптов, степень

покрытия востребованных типов средств измерений, а также влияние автоматизации на трудоёмкость поверочных процессов и эффективность управления лабораторной деятельностью.

Методологическая основа работы включает анализ практического опыта внедрения и эксплуатации системы UNITESS в метрологических подразделениях ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест». Основные количественные показатели, приведённые в статье, получены авторами на основании внутренней статистики эксплуатации системы. В рамках исследования рассматривались автоматизированные рабочие места, реализованные на базе UNITESS APM, система управления процессами «Метрология 4.0», а также аналитический модуль UNITESS Dashboard.

Для оценки результатов автоматизации использовались следующие подходы:

Анализ объёма разработанных скриптов автоматизации

Рассматривалось количество программных скриптов, созданных для цифровой реализации методик поверки и калибровки различных типов средств измерений.

Оценка покрытия востребованных госреестров. Проводился анализ утверждённых типов средств измерений, по которым за двухлетний период выполнялось более 100 поверок. Для данной группы определялась доля автоматизированных направлений.

Оценивались временные затраты на основные этапы поверки: изучение методики, проведение измерений, обработку результатов и оформление протокола. Полученные показатели сравнивались с аналогичными операциями при использовании автоматизированного рабочего места.

Рассматривались возможности системы «Метрология 4.0» по массовому формированию документов, закрытию работ и передаче сведений в государственные информационные системы.

Анализировалась роль UNITESS Dashboard в повышении прозрачности процессов, контроле загрузки персонала, выявлении проблемных участков и мониторинге производственных показателей лабораторий.

Такой подход позволяет комплексно оценить влияние автоматизации как на непосредственное выполнение метрологических операций, так и на управленческие, административные и организационные процессы лаборатории.

В реалиях современного мира в условиях постоянного совершенствования и модернизации средств измерений, постоянно возрастающий объем метрологических работ делает актуальным вопрос повышения производительности труда.

Автоматизация процессов поверки и калибровки является одним из ключевых направлений повышения эффективности деятельности метрологических подразделений. Под автоматизацией в данной работе понимается внедрение программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих автоматическое/полуавтоматическое управление измерительным оборудованием,

выполнение расчётов в соответствии с методиками поверки и формирование отчётной документации без участия оператора либо с его минимальным участием.

В настоящее время в ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест» автоматизировано более 100 рабочих мест по поверке и калибровке СИ.

Система менеджмента и автоматизации лабораторий UNITESS предназначена для комплексной автоматизации поверочных, испытательных и калибровочных лабораторий и включает в себя следующие взаимно дополняющие элементы:

- база данных UNITESS DB – программное обеспечение, предназначенное для автоматизации контроля за работой персонала и функционированием лаборатории в целом, документооборотом и проведения анализа результатов деятельности лаборатории;
- программное обеспечение Метрология 4.0 – «тонкий клиент» базы данных UNITESS DB, предназначенный для представления в удобной форме отчётов, отражающих различные аспекты деятельности лабораторий с возможностью фильтрации результатов по нескольким критериям. Имеет встроенный диспетчер персональных задач;
- программное обеспечение UNITESS APM – программное обеспечение для автоматизации рабочих мест по проведению поверки, калибровки и испытаниям;
- модуль UNITESS Vision – модуль машинного зрения, позволяющий автоматизировать поверку и калибровку приборов с ЖК экранами, не имеющих интерфейсов управления.

Объём и структура разработанных скриптов автоматизации

Основным инструментом реализации автоматизации процессов поверки и калибровки являются программные скрипты, разработанные в рамках платформы UNITESS APM. Скрипт представляет собой формализованную цифровую реализацию методики поверки конкретного типа средства измерений. Он включает алгоритмы управления эталонным оборудованием, автоматическую установку режимов измерений, регламентированную последовательность выполнения операций, обработку полученных результатов в соответствии с нормативной документацией и формирование протоколов поверки.

Разработка скриптов позволяет трансформировать текстовую методику поверки в структурированный программный алгоритм, исключающий неоднозначность трактовки требований и обеспечивающий воспроизводимость процедуры независимо от исполнителя, а также обеспечить метрологическую прослеживаемость измерений. Таким образом, каждый скрипт является цифровой моделью методики поверки.

В исследуемых лабораториях за анализируемый период было разработано 2178 скриптов автоматизации. Распределение количества разработанных скриптов по лабораториям представлено на рисунке 1.

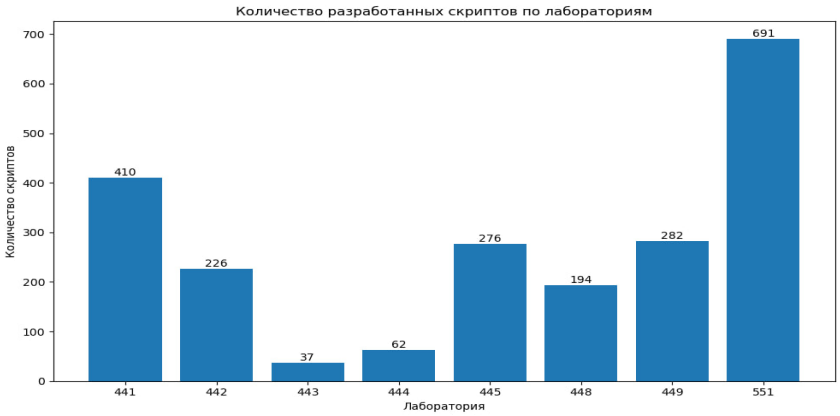


Рис. 1. Количество разработанных скриптов автоматизации по лабораториям

Покрытие активно используемых госреестров и коэффициент цифровой зрелости

Для более объективной оценки эффективности внедрения автоматизации был проведён дополнительный анализ утвержденных средств измерений, которым за двухлетний период выполнялось более 100 поверок. Данный критерий позволяет выделить наиболее популярные утвержденные типы средств измерений, оказывающие наибольшее влияние на общую трудоёмкость работ.

Общее количество таких активно используемых госреестров составило 1529. Из них автоматизировано 553. Таким образом, коэффициент покрытия наиболее востребованных направлений автоматизацией определяется выражением:

и составляет приблизительно 36,2%.

Полученное значение свидетельствует о том, что более трети направлений с высоким объёмом выполняемых работ уже реализованы в виде автоматизированных сценариев.

Распределение количества автоматизированных и неавтоматизированных утверждённых типов средств измерений с порогом более 100 работ по лабораториям представлено на рисунке 2.

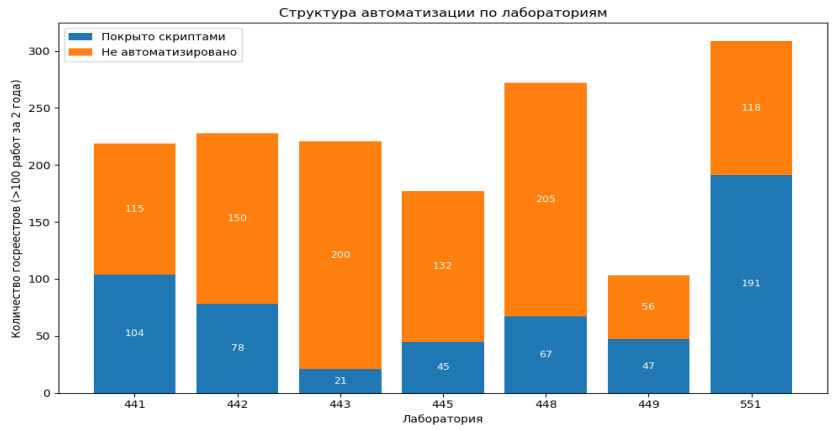


Рис. 2. Структура покрытия госреестров (>100 работ за 2 года) по лабораториям

Как следует из рисунка 2, наибольший уровень автоматизации среди наиболее востребованных направлений достигнут в лаборатории №551 (191 автоматизированный госреестр из 309), что отражает высокий уровень цифровой зрелости данного подразделения. Существенные показатели также характерны для лабораторий №441 (104 из 219), №442 (78 из 228) и №449 (47 из 103), где автоматизация охватывает значительную долю направлений с высокой повторяемостью работ.

Следует отметить, что лаборатория №444 не включена в сравнительный анализ по критерию более 100 работ на госреестр, поскольку в подразделении применяются универсальные скрипты, охватывающие множество утвержденных средств измерений. Это затрудняет корректное сопоставление показателей с данными по отдельным госреестрам.

Внедрение автоматизации в данных лабораториях приводит к сокращению времени выполнения поверки за счёт исключения этапов ручной установки режимов, обработки измерительной информации и оформления протоколов.

Таким образом, внедрение автоматизации оказывает системное влияние на производительность труда и обеспечивает оптимизацию использования кадровых ресурсов.

Влияние автоматизации на трудоёмкость поверочных процессов

Процесс поверки средства измерения включает последовательные операции: изучение методики, проведение измерений, обработку результатов и оформление протокола. В традиционной модели значительная часть операций выполняется вручную, что увеличивает временные затраты и риск расчётных ошибок.

По результатам анализа статистических данных лаборатории №551 (рабочее место «Поверка мультиметров стационарных») установлено, что продолжительность выполнения операций без применения автоматизированного рабочего места варьируется следующим образом:

изучение методики – 10–30 минут;

проведение измерений – 40–180 минут;

обработка результатов – 10–25 минут;

оформление протокола – 10–15 минут.

Существенная доля времени приходится на этап изучение методики, обработки результатов и оформления протоколов.

Сравнительная схема выполнения поверки в традиционном и автоматизированном режиме представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Сравнительная схема выполнения поверки без автоматизации и с применением АРМ

После внедрения АРМ, реализованного на базе скриптов UNITESS, запуск сценария занимает 2–3 минуты, установка режимов и обработка результатов выполняются автоматически, а формирование протокола сокращается до 1 минуты. Также сокращается продолжительность проведения измерений за счёт автоматической установки режимов и регламентированной последовательности операций.

Как следует из рисунка 3, автоматизация позволяет исключить этап повторного изучения методики, сократить время проведения измерений за счёт автоматической установки режимов и регламентированной последовательности операций, а также минимизировать затраты времени на обработку результатов и формирование протокольной документации. В лаборатории №551 снижение трудоёмкости составило порядка 50%, тогда как в целом по лабораториям сокращение времени выполнения поверочных процедур варьируется от 20 до 70% в зависимости от структуры методики, доли вычислительных операций и характера выполняемых работ.

Принципиально важным результатом внедрения АРМ является:

- максимальное снижение (там, где возможно, полное исключение) влияния «человеческого фактора» на процессы поверки, калибровки средств измерений;
- проведение всех операций поверки, калибровки в соответствии с требованиями стандартов и методик;
- воспроизводимость методик поверки, калибровки независимо от исполнителя работ и места проведения поверки, калибровки;
- увеличение экономического эффекта за счёт снижения затрачиваемого времени на поверку, калибровку;
- уменьшение возможного количества ошибок при поверке, калибровке;
- повышение достоверности результатов поверки, калибровки;
- повышение эффективности использования эталонов.

Функциональные возможности системы управления Метрология 4.0

Наряду с автоматизацией измерительных процедур важнейшим элементом цифровой трансформации лабораторий является управление бизнес-процессами поверки и калибровки. В рамках экосистемы UNITESS данная функция реализуется через систему «Метрология 4.0», представляющую собой прикладное программное решение для сопровождения полного жизненного цикла поверки средства измерений – от взятия в работу прибора до закрытия работы и передачи сведений в ФГИС «АРШИН».

ПО Метрология 4.0 обеспечивает централизованное управление процессом закрытия работ, формирование свидетельств о поверке, сертификатов калибровки, заключений о непригодности, а также передачу данных в государственные информационные системы. В отличие от традиционного подхода, при котором оформление документов осуществляется по каждому прибору отдельно, система реализует механизм массовой обработки.

Массовый режим формирования документов

Одним из ключевых преимуществ системы является массовый режим формирования документов. Поверитель может закрывать одновременно неограниченное количество приборов одного типа, что резко снижает трудоёмкость административных операций.

При средней длительности оформления одного свидетельства порядка 1,5 минуты в одиночном режиме оформление партии из 100 приборов требует около 150 минут, тогда как при массовом режиме аналогичная операция выполняется одним действием и занимает порядка 1,5 минуты. Сравнение временных затрат на оформление партии из 100 свидетельств в одиночном и массовом режиме представлено на рисунке 4.

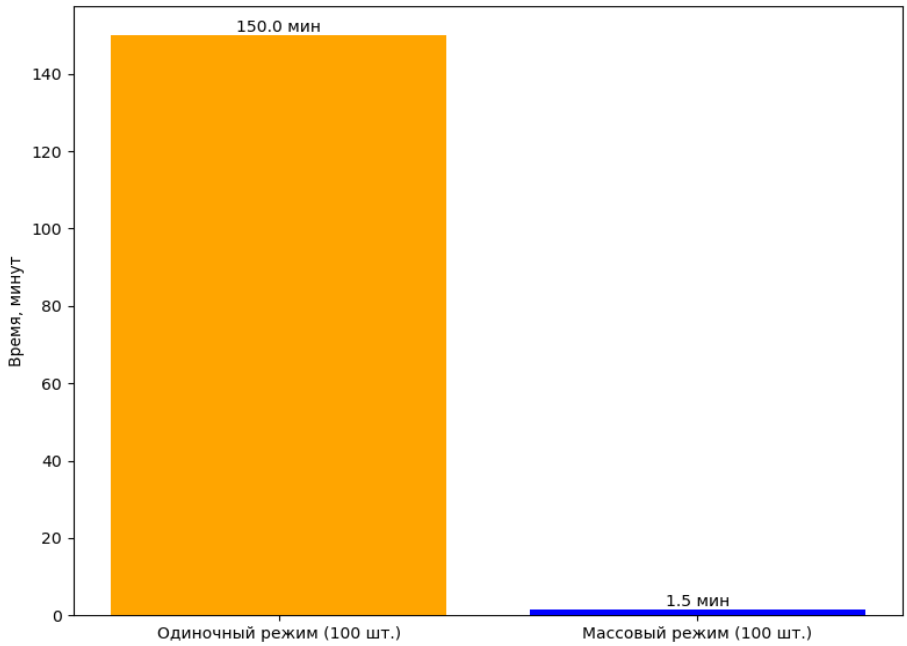


Рис. 4. Сравнение процедуры оформления свидетельств в одиночном и массовом режиме

Удобство работы и влияние цифровой среды на адаптацию новых сотрудников

Внедрение автоматизированных рабочих мест и системы «Метрология 4.0» оказывает существенное влияние на процесс профессиональной адаптации новых сотрудников. Алгоритмизованная структура метрологических операций, автоматическое формирование свидетельств о поверке позволяют специалисту быстрее освоить порядок выполнения работ без необходимости глубокого анализа всей документации на начальном этапе.

Цифровая регламентация операций обеспечивает строгое соответствие требованиям методик поверки и исключает пропуск этапов, что снижает риск отклонений от установленного порядка проведения работ методикой.

Таким образом, применение АРМ и системы управления «Метрология 4.0» сокращает период адаптации новых сотрудников, уменьшает нагрузку и способствует более быстрому достижению нормативной производительности.

Управленческий функционал и аналитическая панель UNITESS Dashboard

Наряду с автоматизацией рабочих мест и системой управления «Метрология 4.0» в структуре цифровой экосистемы используется отдельный управленческий модуль -UNITESS Dashboard, предназначенный для оперативного мониторинга и анализа деятельности лаборатории.

Аналитическая панель ориентирована на руководителей подразделений и обеспечивает:

- прозрачность выполнения и закрытия работ в режиме реального времени;
- контроль текущей и плановой загрузки персонала;
- выявление просроченных и приоритетных участков процесса;
- мониторинг финансовых показателей и объёмов выполненных работ;
- оценку производительности лабораторий и отдельных рабочих мест.

В отличие от традиционных отчётных форм, формируемых постфактум, UNITESS Dashboard предоставляет актуализированную информацию о состоянии процессов, что позволяет руководителю отслеживать динамику выполнения работ на всех этапах – от принятия средства измерений в работу до формирования итоговой документации и передачи данных в ФГИС «АРШИН».

Таким образом, внедрение UNITESS Dashboard формирует прозрачную систему управления рабочими процессами, повышает контролируемость производственной деятельности и способствует устойчивости функционирования метрологического подразделения в условиях роста объёмов работ.

Список литературы

1. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
3. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения.
4. Документация системы UNITESS APM.
5. Документация системы «Метрология 4.0».
6. Внутренние статистические данные эксплуатации системы UNITESS в ФБУ «НИЦ ПМ – Ростест» за анализируемый период.

Назаров Д.В.
к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории «Инженерия поверхности»,
Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Россия, Самара
доцент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»
Самарский государственный технический университет
Россия, Самара
dennynaz@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ МЕХАНООБРАБОТКИ

Аннотация. В статье рассматривается роль автоматизированного, встроенного непосредственно в процесс обработки, контроля текстуры поверхности в цифровой трансформации управления качеством механообработки. Показано, что традиционные пооперационные методы контроля (инструментальные, профилометрия, измерения на микроскопах, координатно-измерительных машинах) не обеспечивают требуемой скорости и полноты данных для адаптивного управления процессом механической обработки. Предлагается концепция замкнутого цифрового контура «сенсор – обработка сигнала – обратная связь на станок», реализованная на основе оптических 3D-сенсоров и алгоритмов в реальном времени. Анализируются основные причины, сдерживающие внедрение: синхронизация измерений с циклом обработки, фильтрация помех (вибрации, СОЖ), калибровка в условиях производства. Показано, что перспективными направлениями являются предиктивный контроль каждой детали и создание цифровых двойников поверхности, прогнозирующих эксплуатационные свойства. Результаты могут быть использованы при построении систем «умного производства» в машиностроении.

Ключевые слова: цифровизация управления качеством, встроенный контроль текстуры поверхности, автоматизированный контроль механообработки, адаптивное управление процессом резания, цифровой двойник поверхности детали, оптическая 3D-профилометрия, предиктивное качество в машиностроении.

Nazarov D.V.
Candidate of technical sciences, Senior Researcher
at the Surface Engineering Laboratory,

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences
Russia, Samara
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering,
Machine Tools and Tools
Samara State Technical University
Russia, Samara
dennynaz@yandex.ru

AUTOMATED SURFACE TEXTURE CONTROL IN MACHINING QUALITY MANAGEMENT

Abstract. The article discusses the role of automated, inprocess (builtdirectlyintothemachining) surface texture control in the digital transformation of machining quality management. It is shown that traditional postoperation inspection methods (instrumental measurements, profilometry, microscopebased measurements, coordinate measuring machines) do not provide the required speed and data completeness for adaptive control of the machining process. A concept of a closed digital loop «sensor – signal processing – feedback to the machine tool» is proposed, implemented on the basis of optical 3D sensors and realtime algorithms. The main barriers to implementation are analysed: synchronisation of measurements with the machining cycle, noise filtering (vibrations, cutting fluids), and calibration under production conditions. It is shown that promising directions include predictive control of each workpiece and the creation of digital surface twins that forecast functional properties. The results can be used in building «smart manufacturing» systems in mechanical engineering.

Keywords: digitalization of quality management, inprocess surface texture control, automated machining quality control, adaptive control of the cutting process, digital twin of the part surface, optical 3D profilometry, predictive quality in mechanical engineering.

Современное машиностроительное производство требует перехода от выборочного приемочного контроля к сплошному мониторингу качества в режиме реального времени. Текстура поверхности (шероховатость, волнистость, топография) является ключевым параметром, определяющим износостойкость, герметичность и усталостную прочность деталей. Как отмечено в работе [1], для функциональных поверхностей необходимо использовать топологические параметры, учитывающие пространственную структуру рельефа. В статье [2] подчеркивается, что требования к текстуре должны формироваться исходя из функционального назначения детали. Однако применяемые на практике методы контроля: профилометрия с алмазной иглой, координатно-измерительные машины, лабораторные измерения на микроскопах – дискретны, трудоемки и, главное, не интегрированы в технологический процесс.

Традиционные методы контроля качества механообработки применяются, как правило, после завершения операции или изготовления партии деталей. Это не позволяет оперативно выявлять отклонения по размерам, форме и микрогеометрии поверхности в процессе резания. Между тем, на формирование этих отклонений влияет множество факторов: жёсткость технологической системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – де-

таль), для повышения которой, например, при обработке тонкостенных прецизионных деталей используются специальные оправки [3], режимы резания (подача, скорость, глубина) [4, 5], тепловыделение в зоне резания, приводящее к температурным деформациям [6], износ инструмента и вибрации, генерируемые как самим станком, так и возникающие в процессе обработки [7], а также свойства материала заготовки и другие. Отсутствие встроенного автоматизированного контроля, работающего в реальном времени, не дает возможности своевременно корректировать параметры обработки. В результате отклонения от требований конструкторской документации (КД) обнаруживаются постфактум, что приводит к браку, необходимости доработки или заведомому ужесточению допусков.

Цель статьи – обосновать место автоматизированного встроенного контроля текстуры поверхности в цифровизации управления качеством, выявить главные проблемы при его внедрении и обозначить перспективные направления развития.

В основе предлагаемого подхода лежит создание замкнутого цифрового контура управления качеством, который позволяет интегрировать процесс измерения текстуры поверхности непосредственно в технологический цикл механообработки и использовать полученные данные для автоматической коррекции режимов резания. На рисунке представлена структурно-информационная модель этого контура.

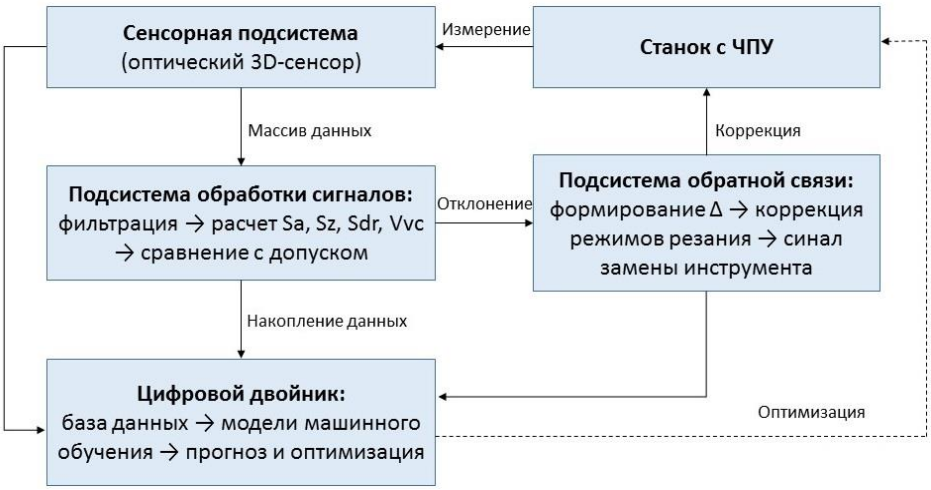


Рис. Структурно-информационная модель замкнутого цифрового контура управления качеством механообработки на основе встроенного контроля текстуры поверхности

Как показывает обзор передовых практик, современные системы встроенной метрологии являются важнейшим инструментом контроля качества при производстве деталей с прецизионными поверхностями [8]. Контур включает четыре основные подсистемы.

1. Сенсорная подсистема (измерение)

Для бесконтактного, высокоскоростного измерения топографии поверхности в качестве первичного измерительного преобразователя предлагается использовать оптический 3D-сенсор, работающий на принципе лазерной конфокальной микроскопии или интерферометрии. Сенсор встраивается в рабочее пространство станка с ЧПУ, что позволяет производить измерения без демонтажа детали и ее переустановки. Время, необходимое для сканирования зоны размером 1×1 мм, составляет от 1 до 5 секунд, что сопоставимо со вспомогательными ходами инструмента. Оптоэлектронные методы демонстрируют высокую эффективность не только для измерения текстуры, но и для выявления поверхностных дефектов (царапин, раковин) непосредственно в процессе обработки [9]. Сенсор формирует массив высот (z-координат) для каждой точки (x, y) в поле зрения, представляя собой цифровую 3D-модель участка поверхности.

2. Подсистема обработки сигналов (вычисление параметров)

Полученный массив данных о топографии требует очистки от помех и последующего анализа. Для фильтрации помех разработаны алгоритмы на основе вейвлет-преобразований, предназначенные для подавления высокочастотных вибраций станка (амплитудой до 2 мкм) и удаления выбросов, вызванных наличием остаточной смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на поверхности.

После фильтрации вычисляются параметры 3D-текстуры поверхности в соответствии с международными стандартами. Традиционные методы анализа профилограмм, основанные на обработке двумерных сечений [10], не позволяют в полной мере охарактеризовать функциональные свойства поверхности, что обосновывает переход к ареальным параметрам. Полученные значения параметров в реальном времени сравниваются с заданными технологическими допусками.

3. Подсистема обратной связи (адаптивное управление)

При обнаружении отклонения какого-либо из контролируемых параметров текстуры за пределы допуска, система инициирует выработку корректирующего воздействия. Рассогласование между измеренным и требуемым значением параметра качества преобразуется в сигнал управления для ЧПУ станка. В зависимости от типа отклонения (увеличение или уменьшение шероховатости) и его величины, система автоматически корректирует режимы резания (изменение подачи инструмента, корректировку скорости резания или глубины, подачу сигнала на поднастройку или замену инструмента при критическом износе). Развитие подходов к созданию «адаптивных цифровых двойников» показывает, что нейро-нечеткое управление позволяет снизить ошибку контроля шероховатости с 11% до 0,8% [11]. Это позволяет обеспечить нахождение параметров качества в требуемом поле допуска для каждой детали, а не по результатам выборки.

4. Подсистема цифрового двойника (накопление и прогнозирование)

Цифровые двойники играют ключевую роль в интеллектуальных производственных системах [12]. Все данные, собранные в процессе обработки,

не удаляются, а накапливаются в базе данных, формируя основу для цифрового двойника каждой изготовленной детали и всего технологического процесса в целом. Для каждой детали фиксируется полный вектор данных: шифр детали, время обработки, режимы резания, параметры вибрации, полная топография поверхности и результат контроля. На основе данных, накопленных при предыдущих обработках, с использованием методов машинного обучения создаются модели, способные прогнозировать качество поверхности еще до начала обработки, на основе износа инструмента и свойств материала заготовки.

Проведена опытная отработка по точению образцов из различных материалов (конструкционная сталь 45, титановый сплав ОТ4) на станке с ЧПУ, оснащенным экспериментальным оптическим сенсором.

Для оценки систематической погрешности и валидации предложенного метода результаты, полученные непосредственно на станке оптическим сенсором, сравнивались с эталонными измерениями на контактном профилометре.

Дополнительно применялось статистическое управление процессом (SPC): с помощью контрольных карт Шухарта анализировалась стабильность процесса обработки и эффективность системы адаптивного управления, а также оценивалась воспроизводимость процесса с использованием индексов Cp и Cpk.

Результаты

1. Подтверждена принципиальная возможность встроенного контроля ареальных параметров шероховатости непосредственно на станке с ЧПУ. Погрешность измерений оптического сенсора в диапазоне Ra 0,1–6,3 мкм не превысила 8% относительно эталонного профилометра, что приемлемо для оперативной коррекции.

2. Разработана методика фильтрации помех, позволяющая выделять полезный сигнал топографии при наличии СОЖ и незначительных вибрациях (амплитуда до 2 мкм). Использована комбинация вейвлет-фильтрации и робастных алгоритмов исключения выбросов.

3. Создан прототип замкнутого контура для токарной обработки: при превышении параметра Sz на 15% от допуска система автоматически уменьшает подачу на 10%, что возвращает текстуру в допуск за один проход. Эффективность подтверждена партией из 30 деталей (снижение разброса параметра Sz в 1,8 раза по сравнению с управлением без обратной связи).

4. Сформулированы основные причины, сдерживающие внедрение:

– синхронизация времени измерения с тактом производства (требуется дальнейшее ускорение сенсоров до <1 с на зону);

– калибровка оптических сенсоров в условиях тепловых деформаций станка;

– интеграция данных в корпоративные MES-системы.

5. Намечены направления дальнейших исследований:

– переход от реактивной коррекции к предиктивной (прогнозирование качества по износу инструмента с использованием нейросетевых моделей);

– формирование цифровых двойников поверхности для имитационного моделирования сборки и эксплуатации;

– распространение подхода на другие виды обработки (шлифование, хонингование) и материалы.

Работа выполнена сотрудниками лаборатории «Инженерии поверхности» в рамках государственного задания Минобрнауки России для СамНЦ РАН по теме № FMRW-2025-0052.

Список литературы

1. Топологические параметры текстуры функциональных поверхностей / В.Н. Крутиков, С. Ю. Золотаревский, В. Г. Лысенко, В. Л. Лясковский // Метрология. – 2013. – № 2. – С. 25–32. – EDN PVHTTX.

2. Назаров Д. В. Специфика формирования требований к параметрам текстуры поверхностей по функциональному назначению // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 267–274. – DOI: 10,24412/2071-6168-2025-12-267-268. – EDN VQEBEZ.

3. Тюлевин С. В., Назаров Д. В., Богданович В. И., и др. Оправка для закрепления тонкостенной детали при прецизионном шлифовании: пат. 2616738 Рос. Федерация: № 2015139616: заявл. 17.09.2015: опубл. 18.04.2017. – EDN CVKJSP.

4. Аллагулов В. Р., Шкаликов Е. А. Зависимость шероховатости от режимов резания // Молодой ученый. – 2023. – № 16 (463). – С. 12–16. – URL: https://moluch.ru/archive/463/101715 (дата обращения: 21.02.2026).

5. Михеенко И. С., Смелик А. А., Егоров С. А., Черняк В. В. Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита // RUDN Journal of Engineering Researches. – 2021. – Т. 22, № 2. – С. 162–171. – DOI: 10,22363/2312-8143-2021-22-2-162-171.

6. Безъязычный, В. Ф. Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения / В. Ф. Безъязычный, М. Счерек // Записки Горного института. – 2018. – Т. 232. – С. 395–400, – DOI 10,31897/PMI.2018.4.395. – EDN YTDTZZ.

7. Заковоротный, В. Л. Изучение отображения вибрационных возмущений в геометрии формируемой резанием поверхности при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 107–126. – DOI 10,17212/1994-6309-2024-26.2-107-126. – EDN GTCVWL.

8. Gao W., Haitjema H., Fang F. Z., Leach R. K., Cheung C. F., Savio E., Linares J. M. On-machine and in-process surface measurement for precision machining // CIRP Annals. – 2019. – Vol. 68, Iss. 2. – P. 843–866.

9. Nosov, N. V. The study of surface defects in the raceways of instrument bearings by the optoelectronic method / N. V. Nosov, D. V. Nazarov, I. A. Rogozhnikov // Optical and Computational Technologies for Measurements and Industrial Applications (OptiComp 2025) : Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. International Conference., Bukhara, 23–24 мая 2025 года. – Bukhara: SPIE, 2025. – P. 1380305. – DOI 10,1117/12.3077706. – EDN JCYULZ.

10. Абрамов А. Д., Носов Н. В., Костин Н. А. Анализ структурных параметров профилограммы поверхности в оптико-электронных системах // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XIX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 10–11 ноября 2022 года / Отв. редактор Р.Г. Гришин. –

Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 3–5. – EDN SMVNCW.

11. Seid Ahmed Y., ElMaraghy W., ElMaraghy H. Adaptive digital twin for product surface quality: supervisory controller for surface roughness control // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 135, Iss. 5–6. – P. 2117–2130, – DOI: 10,1007/s00170-024-14607-3.

12. Акинцева, А. В. Цифровой двойник формообразования обрабатываемой поверхности нежесткого вала с эллипсным профилем при круглом врезном шлифовании / А. В. Акинцева, П. П. Переверзев, А. С. Дегтярева-Кашутина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т. 19, № 4. – С. 98–106. – DOI 10,18503/1995-2732-2021-19-4-98-106. – EDN MXZHYN.

Хазиев Б.Р.
студент
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
Hazbulat25072007@mail.ru
Фахрутдинова А.А.
ассистент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
arinapyfik@yandex.ru

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ SMART GRID В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы городских электрических сетей Российской Федерации, связанные с высоким износом оборудования и ростом нагрузок. На конкретных примерах анализируются барьеры и эффекты внедрения концепции Smart Grid на основе отечественных пилотных проектов. Выявляются типичные сложности, с которыми сталкиваются сетевые компании при цифровизации, включая интеграцию нового оборудования со старым, кадровые ограничения и вопросы кибербезопасности. Приводятся показатели реализованных проектов в Москве, Казани, Санкт-Петербурге и Екатеринбурге. Результаты подтверждают повышение надежности электроснабжения и сокращение потерь, а также демонстрируют окупаемость вложений в горизонте нескольких лет. На основе анализа текущей динамики представлен прогноз развития умных сетей в российских городах на ближайшие пять лет с учетом различных экономических условий. Отдельное внимание уделено перспективам внедрения Smart Grid в городе Нижнекамске: анализируется необходимость автоматизации для крупного промышленного центра, оцениваются ожидаемые экономические эффекты и сроки окупаемости, а также текущий статус реализации пилотных проектов. Также в статье подчеркивается, что для масштабирования успешных решений требуется унификация технических стандартов и активное взаимодействие между различными территориальными сетевыми организациями. Отмечается, что цифровизация позволяет не только повысить надежность, но и создать основу для внедрения новых сервисов для потребителей, а также для более гибкого управления пиковыми нагрузками. В качестве одного из ключевых факторов устойчивого

развития отрасли выделяется необходимость комплексного подхода, сочетающего модернизацию инфраструктуры с развитием нормативной базы и программ повышения квалификации персонала.

Ключевые слова: Smart Grid, городские электрические сети, цифровизация энергетики, умные счетчики, реклоузеры, надежность электроснабжения, распределительные сети, Нижнекамск.

Haziev B.R.
Student
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
Hazbulat25072007@mail.ru
Fakhrutdinova A.A.
Assistant of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
arinapyfik@yandex.ru

ANALYSIS OF SMART GRID DEVELOPMENT PROSPECTS IN URBAN ELECTRIC NETWORKS

Abstract. The article discusses the problems of urban electrical networks in the Russia, which are associated with high equipment wear and tear and increasing loads. It analyzes the barriers and effects of implementing the Smart Grid concept based on domestic pilot projects using specific examples. The article identifies typical challenges faced by network companies during digitalization, including the integration of new equipment with old equipment, staffing constraints, and cybersecurity issues. The article provides data on the implemented projects in Moscow, Kazan, St. Petersburg, and Yekaterinburg. The results confirm the improvement in power supply reliability and the reduction of losses, as well as demonstrate the return on investment over a few years. Based on the analysis of current dynamics, the paper presents a forecast for the development of smart grids in Russian cities over the next five years, taking into account various economic conditions. Special attention is paid to the prospects for implementing Smart Grids in the city of Nizhnekamsk, where the need for automation for a large industrial center, the expected economic effects and payback periods are estimated, as well as the current status of pilot projects implementation. The paper formulates recommendations for scaling successful solutions and accelerating the digitalization of distribution networks.

Keywords: Smart Grid, urban electrical networks, digitalization of the energy sector, smart meters, reclosers, reliability of electricity supply, distribution networks, Nizhnekamsk.

Городские электрические сети являются критически важным элементом инфраструктуры современного мегаполиса. В России и других странах они сталкиваются с рядом системных проблем: физический износ оборудования, рост нагрузок из-за цифровизации, электромобилей и кондиционирования, а также низкая наблюдаемость режимов. В Российской Федерации распределительные сети сталкиваются с рядом системных проблем, которые с каждым годом обостряются. По данным Минэнерго РФ, физический износ оборудования сетей 0,4–10 кВ в городах достигает 60–70%в среднем

по стране, а в некоторых городах-миллионниках 80%. Из-за этого растёт аварийность. Одновременно с этим наблюдается устойчивый рост нагрузок: зарядные станции для электромобилей, тепловые насосы, майнинг, центры обработки данных и просто увеличивающееся число кондиционеров в жилых домах создают локальные перегрузки, на которые старые сети не рассчитаны. К этому добавляется крайне низкий уровень автоматизации – большинство трансформаторных подстанций в городах до сих пор не имеют телеметрии, и при аварии место повреждения ищут обходные бригады в течение одного-двух часов. Без внедрения Smart Grid дальнейший рост нагрузок приведет к системным ограничениям и росту тарифов. Именно в этом контексте концепция Smart Grid рассматривается сегодня не как технологическое излишество, а как необходимое условие дальнейшего устойчивого развития городской энергетики.

Барьеры внедрения Smart Grid

Внедрение Smart Grid в городские электрические сети сопряжено с рядом барьеров, которые необходимо учитывать при планировании любых проектов. Первый и самый очевидный – высокая стоимость замещения. Интеллектуальные счетчики, реклоузеры, системы SCADA и сопутствующее программное обеспечение требуют значительных вложений, которые сетевым компаниям приходится закладывать в инвестиционные программы. Второй барьер носит нормативно-правовой характер. Хотя Федеральный закон №522-ФЗ, обязывающий переход на интеллектуальные приборы учета с 2023 года, создал законодательную базу, реальные темпы внедрения остаются ниже запланированных. Третий барьер связан с кибербезопасностью: управление сетями через открытые каналы связи создает уязвимости, которые необходимо закрывать дополнительными решениями. Наконец существует кадровый дефицит – операторы диспетчерских служб и ремонтные бригады зачастую не имеют достаточной квалификации для работы с цифровыми системами. Если ранжировать барьеры по степени влияния на текущую ситуацию в России, картины выглядит следующим образом. На первом месте с большим отрывом находится нехватка денег. Капитальные затраты на один реклоузер составляют 1,5–2,5% миллиона рублей, на интеллектуальный счетчик 8–12 тысяч рублей. Высокая ключевая ставка делает кредиты недоступными для большинства территориальных сетевых организаций. При нормальной ставке 8–10% проекты окупились бы за 5–7 лет, но при текущей математика не сходится. Второе место занимают риски кибератак. Руководители сетевых компаний боятся, что после автоматизации хакеры смогут отключить целые районы, и хотя надежные решения существуют, они удорожают проекты на 15–25%. Третье место – кадровый дефицит. Диспетчеров, умеющих работать с цифровыми системами, в регионах категорически не хватает. Главный вывод из этого ранжирования: без решения финансового вопроса все остальные проблемы являются вторичными.

Если появятся деньги, то можно обучить кадры, разработать стандарты и преодолеть страхи.

Однако, несмотря на все перечисленные препятствия, эффекты от внедрения Smart Grid, подтвержденные российскими пилотными проектами, оказываются настолько значительными, что сомневаться в целесообразности цифровизации уже не приходится.

Опыт внедрения smart Grid в российских городах

Наиболее показательные результаты получены в Москве, где ПАО «Россети Московский регион» реализовало проект «Цифровой район». Первой пилотной зоной стал район Северное Измайлово, а затем наработки распространили на Центральный и Юго-Восточный административные округа. В рамках проекта было установлено 156 реклоузеров – автоматических пунктов секционирования в сетях 6–10 кВ, 42 тысячи интеллектуальных приборов учета с функцией удаленного отключения, внедрена система мониторинга режимов в реальном времени и автоматического определения места повреждения без выезда бригад. Результаты превзошли ожидания: среднее время восстановления энергоснабжения сократилось с 47 до 9 минут, количество технологических нарушений на 100 километров линий снизилось с 4,2 до 1,8, а потери электроэнергии в сетях 6–10 кВ уменьшились с 8,7% до 6,9%. Успех этого проекта привел к тому, что с 2024 года требования по интеллектуализации стали обязательными для всех новых жилых кварталов при технологическом присоединении.

Не менее впечатляющие результаты демонстрирует Казань. Здесь АО «Сетевая компания» реализовала пилотный проект «Умные сети» в Ново-Савиновском районе – зоне плотной многоэтажной застройки с высокими нагрузками. Была внедрена автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии во всех трансформаторных подстанциях района, установлены восемь автоматизированных распределительных пунктов с возможностью дистанционного переключения, а также запущена система прогнозирования нагрузки на сутки вперед на базе нейросетевых алгоритмов. По итогам 2023 года количество аварийных отключений в пилотном районе снизилось на 34% по сравнению с контрольным районом, где умные сети не внедрялись. Время локализации повреждений сократилось с 32 до 7 минут. Годовой экономический эффект составил около 27 миллионов рублей за счет снижения потерь и уменьшения затрат на выездные бригады. Проект в Казани был признан настолько успешным, что с 2024 года его тиражируют в Набережных Челнах.

Санкт-Петербург пошел по другому пути. Здесь проект «Невская губа» реализовывался не на старом оборудовании, а с нуля – при строительстве новых сетей на намывных территориях Васильевского острова. Это позволило создать полностью автоматизированную схему с кольцеванием на напряжении 10кВ, оснастить каждую трансформаторную подстанцию телемеханикой и удаленным управлением вводами, а также установить «умные» счетчики с функцией определения типа нагрузки (отопление, освещение или

зарядка электромобиля). Результаты, полученные ПАО «Ленэнерго» в 2024 году, выглядят практически эталонными: средняя длительность отключений на одного абонента (показатель SAIDI) составила всего 18 минут в год при среднем по городу 67 минутах. Потери электроэнергии в пилотной зоне снизились до 4,1% против 9,3% в среднем по Санкт-Петербургу. Эксплуатационные затраты сократились на 22% за счет отсутствия необходимости в регулярных обходах подстанций.

Екатеринбург тоже не остался в стороне. Здесь МРСК Урала в 2021–2023 годах реализовала пилот в ВИЗ-Правобережном районе – сложной зоне со смешанной промышленно-жилой нагрузкой. Двенадцать реклоузеров, цифровые трансформаторы тока на 12 подстанциях, система автоматического восстановления питания на 0,4 кВ. Результат: число длительных отключений (дольше часа) снизилось на 41%, потери упали с 10,2% до 8,5%. И важнее всего – фактический срок окупаемости составил 5,2 года, что лучше плановых 7 лет.

Таблица

Сравнение пилотных проектов Smart Grid

Показатель	Москва	Казань	Санкт-Петербург	Екатеринбург
Годы реализации	2019–2023	2021–2023	2022–2024	2021–2023
Основные технологии	156 реклоузеров, 42 тыс. счетчиков, СМРЭ	АСКУЭ, 8 РП, нейросеть	Кольцевание 10 кВ, телемеханика	12 реклоузеров, цифровые ТТ, АВР
Время восстановления	47 мин → 9 мин	32 мин → 7 мин	SAIDI 67 → 18 мин/год	-
Снижение аварийности	С 4,2 до 1,8 на 100 км	–34%	(входит в SAIDI)	–41%
Снижение потерь	8,7% → 6,9%	27 млн руб./год	9,3% → 4,1%	10,2% → 8,5%
Срок окупаемости	6–7 лет	~6 лет	~7 лет	5,2 года
Основная проблема	Интеграция со старым оборудованием	Обучение нейросети 9 мес.	Высокая стартовая стоимость (+35%)	Малый масштаб
Ключевые эффекты	Снижение аварийности в 2,3 раза, снижение времени в 5,2 раза, снижение потерь на 1,8 п.п.	Снижение аварийности на 34%, снижение времени с 32 до 7 мин, экономия 27 млн руб./год	SAIDI снизилось в 3,7 раза, потери снизились на 5,2 п.п., экономия затрат 22%	Снижение отключений на 41%, снижение потерь на 1,7 п.п., окупаемость 5,2 года

Общие выводы по опыту городов

В России умные сети уже доказали свою эффективность. В шестивосьми крупных городах получены одни и те же эффекты: снижение аварийности в 2–2,5 раза, сокращение потерь на 1,5–2,5 процентных пункта, уменьшение времени восстановления с десятков минут до 5–10, Реальная выгода: для города с годовой нагрузкой 1000 ГВт*ч годовая экономия только на потерях составляет 60–100 млн миллионов рублей, с учетом предотвращения

ущерба от аварий общая экономическая выгода может достигать 100–150 миллионов рублей в год. Однако массового распространения пока нет – доля автоматизированных подстанций в городах-миллионниках на начало 2025 года составляет около 12%. Потенциал для роста огромен.

Почему же при столь впечатляющих результатах автоматизировано только 12% подстанций? Причиной всему этому являются вышеперечисленные барьеры; разобщенность сетевых активов: в одном городе сети могут принадлежать разным ТСО, у каждой свои стандарты и бюджеты, что делает комплексную автоматизацию невозможной; инфраструктурная ловушка: большинство подстанций физически не имеют места для установки реклоузеров и систем телемеханики, иих нужно либо реконструировать, либо строить новые КТП.

Перспективы внедрения Smart Grid в Нижнекамске

После рассмотрения опыта Москвы, Казани, Санкт-Петребурга и Екатеринбурга возникает вопрос: а нужна ли эта технология другим российским городам? И если да, то какие эффекты она даст и окупится ли вообще? Рассмотрим этот вопрос на примере города Нижнекамск.

Ответ – однозначно да, нужна. Более того, Нижнекамск находится в парадоксально выгодном положении: с одной стороны город сталкивается с теми же проблемами, что и лидеры, а с другой стороны – уже имеет готовые примеры для подражания и, что важно, может не повторять из ошибок.

Нижнекамск – город с развитой нефтехимической промышленностью. Здесь расположены одни из крупнейших заводов в Европе: «Нижнекамскнефтехим», «ТАИФ – НК», «Нижнекамскшина». Эти предприятия критически зависимы от качества и бесперебойности электроснабжения: даже кратковременное отключение может привести к остановке технологических цепочек, выходу из строя оборудования и многомиллионным убыткам. Кроме того, сам город растет, строятся новые жилые кварталы, увеличивается число электромобилей и кондиционеров – нагрузка на старые сети 0,4–10 кВ растет, а их износ, как и в среднем по стране, достигает 60–70%.

Традиционные сети, которые сегодня работают в Нижнекамске, не имеют главного – информативности. Когда происходит авария, диспетчеры не видят, где именно. Бригады выезжают на поиск повреждения, который может занять час-два. Потери электроэнергии составляют высокий процент, за который в конечном счете платят и жители, и промышленность.

Важно отметить, что процесс уже начался. Еще в 2016 году АО «Сетевая компания», к которой относятся Нижнекамские электрические сети, приступило к внедрению элементов «умных сетей» на своих объектах. Пилотные проекты реализуются на территории трех филиалов – Казанских, Набережночелнинских и Нижнекамских электрических сетей. Подтверждением этому служат инвестиционные планы АО «Сетевая компания»: в 2024 году было направлено 14,9 млрд рублей на модернизацию электросетевого комплекса Татарстана, в 2025 году – 14,2 млрд рублей, а на период 2025–

2029 годов запланировано более 73 млрд рублей. В отчетах компании прямо указано, что внедрение Smart Grid позволило снизить потери и повысить показатели надежности SAIDI и SAIFI. Кроме того, в 2025 году АО «Сетевая компания» объявила тендеры на выполнение комплекса работ «Умные сети» в филиале Нижнекамские электрические сети с начальной ценой контракта около 800 млн рублей. Это прямое свидетельство того, что город включен в республиканскую программу автоматизации.

Сейчас «Сетевая компания» внедряет в республике интеллектуальные сети на распределенной архитектуре: трансформаторные пункты оснащаются контроллерами, индикаторами короткого замыкания и коммутационной техникой с телеуправлением. Проект уже охватывает более 35% сетей Казани и 60% сельских сетей республики. Нижнекамск должен стать следующим.

Опираясь на опыт Казани – ближайшего к Нижнекамску города – лидера по внедрению умных сетей, а также на данные по Москве и Екатеринбургу, можно с высокой точностью прогнозировать эффекты.

Снижение времени восстановления.

Сегодня при отключении в распределительной сети Нижнекамска время локализации и восстановления составляет в среднем от 30 до 60 минут. Внедрение реклоузеров и систем автоматического секционирования сократит этот показатель до 5–10 минут. Для промышленных предприятий каждый сэкономленный час без простоя – десятки миллионов рублей предотвращенного ущерба.

Снижение аварийности.

Как показал опыт Казани, автоматизация позволяет снизить количество аварийных отключений на 30–40% за счет того, что сеть начинает «видеть» предпосылки перегрузок и предупреждать их.

Снижение потерь электроэнергии.

Потери в сетях среднего и низкого напряжения в городах Татарстана сегодня составляют 10–12% и выше. Опыт Казани и Набережных Челнов показывает, что потери снижаются на 1,5–2,5% процентных пункта. Для Нижнекамска это означает годовую экономию в 50–100 миллионов рублей только на потерях.

Повышение надежности (SAIDI).

В Татарстане за 10 лет автоматизации показатель SAIDI улучшился более чем в 10 раз и сейчас составляет около 10 минут. В Нижнекамске, где сегодня этот показатель может достигать 60–80 минут, реально достичь 15–20 минут в течение 3–4 лет после начала активной фазы внедрения.

Сроки окупаемости.

Исходя из опыта Екатеринбурга (5,2 года), Казани (около 6 лет) и Уфы, срок окупаемости капитальных затрат на автоматизацию распределительных сетей Нижнекамска оценивается в 5–7 лет. Это вложение не просто окупается, но и приносит чистую экономию в долгосрочной перспективе, а

главное – снижает риски для промышленности, на которой держится экономика города.

Smart Grid для Нижнекамска – экономическая и технологическая необходимость. Город уже включен в республиканскую программу автоматизации, у него есть примеры соседей (Казань, Набережные Челны) и готовые технические решения. Более того, уже объявлены тендеры на работы в Нижнекамских электрических сетях на сумму около 800 млн рублей. Оптимальный план – масштабирование пилотных решений с наиболее проблемных участков на весь город, с фокусом на питание промышленных зон. При реалистичном сценарии к 2030 году Нижнекамск может достичь 30–40% автоматизированных подстанций, что даст городу и его промышленности более надежное и дешевое электричество, снижение аварийности и многомиллионную экономию.

Каковы же перспективы на ближайшие пять лет? За 2020–2024 годы «Россети» установили около 2,3 миллиона интеллектуальных счетчиков – но это намного меньше запланированных 30 миллионов. Главная проблема сейчас – деньги. Высокая ключевая ставка и дефицит инвестиционных бюджетов сетевых компаний серьёзно тормозят процесс. Тем не менее, при умеренно-оптимистичном сценарии к 2030 году доля «умных» счетчиков в российских городах может достичь 85%, а доля подстанций с телемеханикой – 45%. Количество городов с современными системами управления распределительными сетями (ADMS) вырастет с 5 до 25. Рынок Smart Grid в РФ увеличится с 60 миллиардов рублей в год до 180 миллиардов.

При реалистичном сценарии: ключевая ставка остается в диапазоне 11–14%, инвестиционные программы растут медленно – на 3–5% в год. Государственной поддержки Smart Grid нет, но и явных препятствий тоже нет. Доля автоматизированных подстанций к 2030 году составляет 25–30%. Окупаемость составит 6–8 лет. Количество городов с современными системами управления распределительными сетями (ADMS) вырастает с 5 до 15–20,

Пессимистичный сценарий: ключевая ставка выше 15% до 2028 года. Инвестиционные программы реально сокращаются. Сетевые компании экономят во всем, включая автоматизацию. ФЗ-522 выполняется формально (счетчики ставят, а остальное нет). Нижнекамск и другие аналогичные города не начинают внедрение из-за отсутствия денег.

Даже при реалистичном сценарии доля умных сетей вырастет в 2–2,5 раза за пять лет, но для этого нужна проактивная позиция сетевых компаний и региональных властей.

Какие проекты стоит ждать в первую очередь? Полный переход на умные сети в центральных районах Москвы, Санкт-Петербурга, Казани, Екатеринбурга, Новосибирска и Нижнего Новгорода. Запуск системы коммерческих агрегатов спроса (Demand Response) для юридических лиц – это позволит сдвигать пиковые нагрузки без строительства новых мощностей. Внедрение 5G для управления секционированием в реальном времени. Но есть и серьезный риск: если ключевая ставка останется выше 15% несколько

лет, инвестпрограммы сетевых компаний будут свёрнуты, и все сместится на 2–3 года вправо.

Стоит сравнить этот прогноз с официальными целями. Энергостратегия РФ до 2035 года (распоряжение Правительства №1520-р) предполагает долю умных сетей в распределительном комплексе на уровне 30% к 2030 году. В данной работе обосновывается достижимость 45% – и это не завышенная оценка, а реалистичный вывод из опыта Москвы, Казани, Петербурга и Екатеринбурга, где проекты окупились за 5–7 лет.

Итог таков. Smart Grid для российских городов – это не альтернатива, а единственный разумный путь. Отечественные пилоты подтвердили это своими результатами, это не теория, а опыт. В ближайшие пять лет доля автоматизированных подстанций в крупных городах может вырасти до 45%, но для выхода на уровень развитых стран (70–80% автоматизации) потребуется 10–12 лет. Для масштабирования успешных пилотных решений на другие города рекомендуется: унифицировать требования к интеллектуальным устройствам на федеральном уровне; внедрить налоговые льготы для сетевых компаний, инвестирующих в Smart Grid; создать региональные центры компетенций для обучения персонала; а также включить обязательные требования по автоматизации в договоры технологического присоединения новых жилых кварталов. Если эти меры будут реализованы, российские города получат не только более надежное электричество, но и сдержат рост тарифов – за счет снижения потерь и оптимизации затрат. А это в конечном итоге выгодно всем: и сетевикам, и потребителям, и экономике в целом

Список литературы

1. Федеральный закон №522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии» (2018).
2. http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201812280012
3. Годовой отчет ПАО «Россети» за 2022 год. – М., 2023. – 214 с. https://rosseti.ru/investors/ir/disclosure/upload/RSHB_2022_annual_report_rus.pdf
4. Отчет о реализации пилотного проекта «Цифровой район» / ПАО «Россети Московский регион». – М., 2023. – 47 с. https://www.rossetimr.ru/
5. Результаты внедрения автоматизированной системы коммерческого учёта в Ново-Савиновском районе / АО «Сетевая компания» (Республика Татарстан). – Казань, 2023. – 31 с.
6. https://sk-tatenergo.ru/
7. Публичный отчёт ПАО «Ленэнерго» по проекту «Невская губа» за 2024 год. – СПб. 2025. – 28 с.https://www.rosseti-lenenergo.ru/activity/innovations/smartgrid/
8. Энергостратегия Российской Федерации на период до 2035 года (Распоряжение Правительства РФ №1520-р от 09.06.2020).
9. http://static.government.ru/media/files/oNDhR4uqd0G.pdf
10. Сведения о работе Единой энергетической системы России в 2023 году / Системный оператор ЕЭС. – М., 2024. – 86 с.
11. https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2024/
12. Тендер №32515366842: работы в филиале Нижнекамские электрические сети. – Сервис «Всем Подряд», 2025

13. https://vsem-podryad.ru/activepurchase/4e774fe2-c91b-46c0-aaca-e5e9982b3bea/
14. АО «Сетевая компания» в 2025 году направит 14,2 млрд рублей на модернизацию. – Энергострана.ру, 19.03.2025
15. https://energostrana.ru/novosti/novosti-kompanij/ao-setevaya-kompaniya-v-2025-godu-napravit-142-mlrd-rublej-na-modernizaciyu-elektrosetevogo-kompleksa-tatarstana/
16. Обзор рынка IoT в энергетике России (2025–2031). – 6Wresearch.
17. https://www.6wresearch.com/industry-report/russia-iot-in-energy-market

Махъянова А.И.
студент
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
alsumahanova7@gmail.com
Фахрутдинова А.А.
ассистент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
arinapyfik@yandex.ru

БИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ПЕРСОНАЛА: ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И СОЦИАЛЬНОЕ БЛАГОПОЛУЧИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. В данной работе исследуются вопросы безопасности на производстве, связанные с влиянием человеческого фактора, усталости и стресса сотрудников. На основе реальных кейсов анализируется эффективность и препятствия на пути внедрения цифровых систем биометрического мониторинга состояния персонала, реализованных в рамках отечественных экспериментальных проектов в разных секторах экономики и регионах. Выделяются распространенные трудности, с которыми сталкиваются промышленные компании при цифровизации процессов охраны труда, такие как нормативные барьеры, проблемы конфиденциальности данных, техническая сложность интеграции и психологическое сопротивление со стороны персонала. Представлены количественные результаты пилотных проектов в угольной, металлургической, нефтехимической и машиностроительной индустриях. Полученные данные свидетельствуют о сокращении числа производственных несчастных случаев, улучшении состояния здоровья работников и демонстрируют рентабельность инвестиций в течение 4–6 лет. Исходя из текущих тенденций, представлен прогноз развития биометрических систем контроля на российских промышленных предприятиях на ближайшие пять лет, учитывающий различные экономические и законодательные сценарии. Особое внимание уделяется перспективам внедрения в крупных промышленных центрах страны, включая Кузбасс, Челябинскую агломерацию, Татарстан и Свердловскую область. Отмечается, что для успешного масштабирования существующих решений необходимо согласование этических и технических норм, прозрачная политика обращения с данными и активное сотрудничество с профсоюзами. Подчеркивается, что комплексный подход, объединяющий техническое обновление, совершенствование законодательства и программы обучения персонала цифровым навыкам, является ключевым фактором для устойчивого развития отрасли.

Ключевые слова: промышленная безопасность, человеческий фактор, биометрический мониторинг, цифровая трансформация охраны труда, хроническая усталость и стресс, защита персональных данных, производственный травматизм, цифровизация промышленности.

Mahyanova A.I.
Student
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk,
alsumahanova7@gmail.com
Fakhrutdinova A.A.
Assistant of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises,
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
arinapyfik@yandex.ru

BIOMETRIC HEALTH MONITORING OF PERSONNEL: IMPACT ON OCCUPATIONAL SAFETY AND SOCIAL WELL-BEING IN INDUSTRY

Abstract. This paper examines the issues of industrial safety related to the influence of the human factor, employee fatigue and stress. Based on real-world cases, the effectiveness and obstacles to the introduction of digital biometric health monitoring systems implemented as part of domestic pilot projects in various sectors of the economy and regions are analyzed. Common difficulties faced by industrial companies in the digitalization of occupational safety processes are highlighted, such as regulatory barriers, data privacy issues, technical complexity of integration, and psychological resistance from staff. The quantitative results of pilot projects in the coal, metallurgical, petrochemical and machine-building industries are presented. The data obtained indicate a reduction in the number of industrial accidents, an improvement in the health status of employees and demonstrate a return on investment over 4–6 years. Based on current trends, a forecast of the development of biometric control systems at Russian industrial enterprises for the next five years is presented, taking into account various economic and legislative scenarios. Special attention is paid to the prospects of implementation in the country's large industrial centers, including Kuzbass, Chelyabinsk agglomeration, Tatarstan and Sverdlovsk region. It is noted that for the successful scaling of existing solutions, it is necessary to coordinate ethical and technical standards, a transparent data management policy and active cooperation with trade unions. It is emphasized that an integrated approach combining technical updating, improvement of legislation and staff training programs in digital skills is a key factor for the sustainable development of the industry.

Keywords: industrial safety, human factor, biometric monitoring, digital transformation of occupational safety, chronic fatigue and stress, personal data protection, occupational injuries, digitalization of industry.

Ошибки человека по-прежнему являются главной причиной несчастных случаев и травм на производстве в отечественной индустрии. Согласно статистике Роструда, доля происшествий на объектах повышенной опасности, связанных с психофизиологическим состоянием персонала (переутомление, стресс, снижение внимательности, скрытые недуги), колеблется от 70% до 85%. Существующие практики медицинского контроля, такие как предсменные осмотры и наблюдение со стороны мастеров, имеют эпизодический характер и не способны отслеживать изменения в состоянии работника на протяжении всей рабочей смены.

Наряду с этим, происходит увеличение интенсивности трудовых процессов, их технологическая сложность растет, а средний возраст сотрудников на многих производствах приближается к 45 годам и старше, что увеличивает вероятность внезапных ухудшений состояния здоровья. В контексте наступления эры Индустрии 4.0, цифровые системы биометрического контроля (например, носимые устройства для отслеживания сердечного ритма, оксиметры, тепловизоры, системы анализа мимики и реакций зрачков, а также платформы для прогнозной аналитики) рассматриваются не как метод тотального контроля, а как неотъемлемая часть обеспечения безопасности трудовой деятельности и поддержания благополучной атмосферы в рабочих коллективах. Дальнейшее сокращение производственного травматизма без внедрения технологий непрерывного мониторинга столкнется с биологическими ограничениями человеческой выносливости, а издержки предприятий, связанные с социальными последствиями, будут неуклонно возрастать.

Барьеры внедрения цифрового биометрического контроля

Внедрение систем биометрического контроля состояния персонала сопряжено с рядом преград, которые следует учитывать при планировании проектов.

Если говорить о барьерах честно, начать стоит с самого чувствительного – нормативной базы и этики. 152-ФЗ «О персональных данных» вместе с Трудовым кодексом выдвигают жёсткие, но не всегда до конца понятные бизнесу требования: получи явное согласие работника, чётко пропиши, зачем собираешь его биометрию, и обеспечь полную конфиденциальность. На практике многие компании банально путаются в трактовках Роструда и Роскомнадзора, а пока юристы разбираются, поставки встают – и это уже не гипотетический риск, а реальные деньги.

Второй тормоз – чисто финансовый. Один терминал для снятия биометрических данных стоит от 15 до 45 тысяч рублей, и это лишь верхушка айсберга. Годовая лицензия на софт для аналитики легко улетает в диапазон от 2 до 8 миллионов. А ведь всё это добро нужно ещё и подружить с теми платформами по охране труда, которые уже работают на предприятии – ERP, EHS и прочими. Никто не закладывает эти расходы в бюджет с радостью.

Третий момент – технологический. Как бы красиво ни работало оборудование в идеальных условиях, реальный цех – это совсем другая история. Пыль столбом, вибрация от станков, электромагнитные помехи – и вот уже датчики начинают врать. Ложные срабатывания системы на таком фоне – не редкость, а прямая угроза производственному циклу. Одна нештатная остановка конвейера из-за того, что камера кого-то «не узнала», способна съесть всю экономию от внедрения.

Наконец, существует преграда, связанная с персоналом и социальными факторами. Часть сотрудников рассматривает биометрические технологии как метод цифрового слежения и принуждения, что порождает противодействие со стороны профсоюзных объединений.

Ранжируя эти барьеры по степени их влияния на текущую ситуацию в России, получаем следующую картину. На первом месте – регуляторная и этическая неопределенность. Отсутствие утвержденных Минтрудом и Роскомнадзором методических рекомендаций по обезличиванию медицинских данных и четких сценариев реагирования заставляет предприятия опасаться штрафов и судебных исков.

Второе место занимает высокая первоначальная стоимость и сложность интеграции. С учетом текущих процентных ставок, срок окупаемости инвестиций увеличивается, а обоснование ROI перед советом директоров становится затруднительным.

Третье место – сопротивление коллективов и недостаточный уровень цифровой грамотности. Необходимо обучать операторов и мастеров не только работе с устройствами, но и формировать доверие к системе.

Основной вывод из данного ранжирования заключается в том, что без формирования прозрачного правового поля и этических стандартов все остальные проблемы являются вторичными. При наличии понятной регуляторной базы и гарантий защиты данных, процесс финансирования и внедрения ускорится многократно.

Опыт внедрения биометрического контроля в российских промышленных кластерах

В Кузбассе был успешно реализован проект «Безопасная смена» группой угольных компаний, демонстрируя наиболее впечатляющие результаты. На трёх шахтах были внедрены предсменные биометрические станции, которые отслеживали частоту сердечных сокращений, уровень насыщения крови кислородом и кожно-гальваническую реакцию. Кроме того, подземные работники были оснащены «умными» касками, оборудованными акселерометрами и датчиками пульса. Система с искусственным интеллектом в режиме реального времени оценивает степень усталости персонала и оповещает диспетчера о потенциальных рисках. По итогам 2023–2024 годов коэффициент частоты травматизма (LTIFR) сократился на 38%, при этом количество зафиксированных микротравм, классифицированных как «предпосылки», увеличилось в 2,7 раза, что способствовало предотвращению 14 случаев, которые могли бы привести к тяжёлым последствиям.

В Челябинской области и Магнитогорске, в рамках металлургического кластера, ПАО «ММК» и ПАО «ЧМК» внедрили систему «Термо-Контроль» в горячих цехах. Сотрудники были обеспечены браслетами с термодатчиками и пульсоксиметрами, которые передавали данные на центральную EHS-платформу. При достижении критических показателей теплового стресса система автоматически предлагала сократить время пребывания в опасной зоне или сделать перерыв. Это привело к снижению случаев термического переутомления на 42%, увеличению производительности на 8% за счёт оптимизации рабочих графиков и уменьшению количества больничных по профессиональным заболеваниям на 19%.

В Татарстане, на предприятиях нефтехимической отрасли в Нижнекамском и Казанском промышленных узлах, АО «ТАИФ-НК» и СИБУР апробировали пилот «Цифровой медосмотр + непрерывный мониторинг». На проходных были установлены комплексы для бесконтактного измерения пульса, температуры и анализа реакции зрачков, а в цехах использовались защищённые носимые трекеры. Система интегрирована с корпоративной диспетчерской и службой охраны труда. К концу 2024 года количество нарушений правил безопасности, связанных с состоянием оператора, уменьшилось на 31%, а среднее время реакции на ухудшение самочувствия сократилось с 45 до 6 минут. Уровень доверия сотрудников вырос после внедрения программы «анонимизированных медицинских отчётов».

Уралвагонзавод в Нижнем Тагиле (Свердловская область) применил подход, сочетающий видеоаналитику и биометрические пропуска. Интеллектуальные камеры на постах анализировали мимику, частоту моргания и позу сотрудников, а идентификационные бейджи регистрировали частоту сердечных сокращений. Результаты пилотного проекта показали снижение длительных отключений внимания на 35%, а фактический срок окупаемости составил 4,1 года, превзойдя запланированный показатель в 6 лет.

Таблица

Сравнение пилотных проектов биометрического контроля состояния персонала

Показатель	Москва	Казань	Санкт-Петербург	Екатеринбург
Годы реализации	2019–2023	2021–2023	2022–2024	2021–2023
Основные технологии	156 реклоузеров, 42 тыс. счетчиков, СМРЭ	АСКУЭ, 8 РП, нейросеть	Кольцевание 10 кВ, телемеханика	12 реклоузеров, цифровые ТТ, АВР
Время восстановления	47 мин → 9 мин	32 мин → 7 мин	SAIDI 67 → 18 мин/год	–
Снижение аварийности	С 4,2 до 1,8 на 100 км	–34%	(входит в SAIDI)	–41%
Снижение потерь	8,7% → 6,9%	27 млн руб./год	9,3% → 4,1%	10,2% → 8,5%
Срок окупаемости	6–7 лет	~6 лет	~7 лет	5,2 года
Основная проблема	Интеграция со старым оборудованием	Обучение нейросети 9 мес.	Высокая стартовая стоимость (+35%)	Малый масштаб
Ключевые эффекты	Снижение аварийности в 2,3 раза, снижение времени в 5,2 раза, снижение потерь на 1,8 п.п.	Снижение аварийности на 34%, снижение времени с 32 до 7 мин, экономия 27 млн руб./год	SAIDI снизилось в 3,7 раза, потери снизились на 5,2 п.п., экономия затрат 22%	Снижение отключений на 41%, снижение потерь на 1,7 п.п., окупаемость 5,2 года

Общие выводы по опыту промышленных кластеров

В Российской Федерации уже подтверждена действенность систем биометрического мониторинга состояния работников на реальных производственных объектах. Были достигнуты значительные результаты: сокращение числа производственных травм на 30–45%, уменьшение количества профессиональных заболеваний, перегревов и физического переутомления, а также сокращение времени реагирования на ухудшение самочувствия с десятков минут до 5–10 минут. Компании с численностью персонала свыше 3000 человек получают годовую экономию в размере 80–150 миллионов рублей благодаря уменьшению выплат по страховым случаям, сокращению простоев и оптимизации затрат на медицинское обслуживание. Тем не менее, широкое внедрение пока не наблюдается: по данным отраслевых экспертов, к началу 2025 года системы непрерывного биометрического контроля были развернуты только на 9–12% крупных промышленных предприятий. Таким образом, потенциал для дальнейшего роста чрезвычайно высок. Почему же, несмотря на столь впечатляющие показатели, автоматизировано лишь около 10% предприятий? Причина кроется в совокупности описанных ранее препятствий: отсутствие унифицированных федеральных стандартов для обработки биометрических медицинских данных, фрагментация существующих ИТ-решений (многие системы несовместимы с 1С:Охрана труда или SAP EHS), а также опасения, связанные с цифровым контролем, которые при отсутствии открытого диалога могут трансформировать технологию заботы в инструмент отчуждения.

Перспективы внедрения в ключевых промышленных центрах России

Исследуя опыт угледобывающей, металлургической, нефтехимической и машиностроительной отраслей, правомерно задаться вопросом о целесообразности применения биометрического мониторинга в других промышленных регионах. Если такая необходимость существует, каковы будут экономические и операционные выгоды, и насколько оправдаются вложенные средства? Рассмотрим данный аспект на примере ведущих промышленных локаций России.

Кузбасс. Уникальное сочетание опасных подземных условий, сурового климата и стареющего состава работников делает традиционные методы обеспечения безопасности недостаточными. В период с 2024 по 2025 год, по инициативе регионального Минэнерго и крупных угледобывающих компаний, была внедрена отраслевая программа «Цифровая безопасность шахт», включающая биометрический контроль. Ожидается, что это позволит сократить время реагирования на ухудшение самочувствия работников до 5–8 минут, предотвратить 20–30 случаев получения тяжелых увечий ежегодно, а также сэкономить до 200 миллионов рублей в год на страховых выплатах и ликвидации последствий простоев. Предполагаемый срок окупаемости инвестиций составляет 4,5–5 лет.

Челябинская область и Южный Урал. Предприятия металлургической и машиностроительной отраслей региона подвержены воздействию высоких температур и вибраций. В инвестиционные планы таких гигантов, как ПАО «ММК», «ЧТПЗ» и «Уралмаш», уже заложено внедрение термо-биометрических браслетов и систем анализа графиков работы. Прогнозируется сокращение тепловых инцидентов на 35–40%, снижение расходов на медицинское обслуживание на 15–20%, а также повышение лояльности персонала благодаря персонализированным рекомендациям по отдыху. Окупаемость ожидается в течение 5–6 лет.

Татарстан (Нижнекамск, Казань, Альметьевск). Нефтехимический комплекс требует от операторов максимальной концентрации на протяжении длительных производственных циклов. Республиканская программа диджитализации промышленности на 2025–2027 годы предусматривает финансирование пилотных проектов по непрерывному биометрическому мониторингу на 5–6 ключевых объектах. Конкурсные процедуры на модернизацию систем охраны труда и промышленной безопасности уже объявлены, с начальной стоимостью контрактов, оцениваемой в 600–850 миллионов рублей. Ожидаются следующие результаты: снижение нарушений, связанных с состоянием оператора, на 30–35%, сокращение времени реагирования до 6 минут, ежегодная экономия в размере 70–120 миллионов рублей и уменьшение текучести кадров на 10–15%.

Свердловская область (Нижний Тагил, Екатеринбург). Машиностроительная и оборонная отрасли нуждаются в высокой степени сосредоточенности и устойчивости производственных операций. Компании в данном регионе проводят испытания комплексных решений, объединяющих видеоаналитику, носимые устройства с датчиками и технологии искусственного интеллекта для определения уровня когнитивной нагрузки. При расширении использования таких систем на более чем десять производственных участков ожидается сокращение ошибок персонала на 30%, снижение доли дефектной продукции на 12% и срок окупаемости в пределах 4–5 лет. Местные органы власти готовы предложить налоговые преференции организациям, которые внедряют профилактические системы для обеспечения безопасности труда.

Подводя итог по всем регионам, можно сделать вывод, что внедрение биометрического контроля является не просто техническим требованием, но и важным стратегическим вложением в развитие человеческих ресурсов для российской промышленности. Несмотря на специфику рисков в каждом кластере, наблюдаются общие положительные эффекты: минимизация аварий, сокращение травматизма, оптимизация медицинских затрат и повышение общего благосостояния сотрудников. Наиболее эффективным подходом представляется запуск пилотных проектов на участках с наибольшей производственной нагрузкой, с обязательным обеспечением прозрачности данных и привлечением профсоюзов к разработке сценариев реагирования. При благоприятном развитии событий, к 2030 году ключевые промышленные

центры страны могут охватить системами предиктивного контроля 35–40% своего персонала.

Текущая ситуация и препятствия: С 2020 по 2024 год российские промышленные предприятия приобрели около 1,2 миллиона носимых биометрических устройств. Однако этот показатель значительно ниже реального потенциала рынка. Основными сдерживающими факторами являются регуляторные и финансовые ограничения. Высокая ключевая ставка, недостаток инвестиционных средств и отсутствие утвержденных Минтрудом стандартов для обработки биометрических медицинских данных замедляют внедрение этих технологий.

Если смотреть на позитивный расклад, то к 2030 году где-то каждый третий, а то и каждый четвёртый крупный игрок вполне сможет внедрить у себя системы прогнозирования состояния здоровья сотрудников. Рынок таких IT-решений, по прогнозам, рванёт вверх: с нынешних 4,5 миллиардов рублей в год до 12–14 миллиардов. Неплохой скачок. Параллельно разрастётся и инфраструктура – количество региональных центров, которые занимаются цифровизацией охраны труда, увеличится с трёх до десяти, а может, и до двенадцати.

Теперь о базовом, реалистичном сценарии. Ключевую ставку ожидаем в коридоре 11–13%, бизнес продолжит потихоньку наращивать инвестиционные программы – плюс 4–6% в год. Должны наконец-то появиться внятные методологические рекомендации по анонимизации данных, что само по себе снимет массу вопросов. В таких условиях доля внедрений биометрической идентификации доберётся до 20–25%, а вложенные деньги компании смогут вернуть за 5–7 лет. Основной спрос предсказуемо пойдёт с опасных участков – горячих цехов, подземных работ и непрерывных производственных линий.

Но есть и негативный сценарий. Если к 2028 году ключевая ставка уйдёт выше 15%, а Роскомнадзор синхронно ужесточит правила хранения биометрии, вся эта цифровизация рискует превратиться в фикцию. Компании перейдут в режим жёсткой экономии, на безопасности начнут откровенно экономить, а пилотные проекты попросту заморозят. Внедрение станет чисто бумажным – лишь бы отчитаться. При таком раскладе реальное проникновение технологий замрёт на уровне 8–10%, а о бурном росте рынка можно будет забыть.

Для обеспечения роста даже в рамках реалистичного прогноза предполагается двукратное увеличение охвата цифрового биометрического контроля за пятилетний период. Однако реализация этого потенциала требует налаживания конструктивного диалога и совместной работы между регулирующими органами, представителями индустрии и профсоюзными организациями.

Наиболее вероятными направлениями развития являются масштабное внедрение предиктивных технологий на угольных разрезах Кузбасса, металлургических предприятиях Урала и в нефтехимическом секторе Татарстана.

Параллельно планируется запуск федеральной платформы «Цифровая охрана труда», которая стандартизирует процедуры обмена обезличенными данными. Кроме того, ожидается сертификация и применение отечественных моделей искусственного интеллекта в качестве медицинских изделий.

Существенный риск заключается в возможности задержки реализации проекта на 3–4 года при отсутствии баланса между необходимыми мерами безопасности и соблюдением конфиденциальности персональной информации.

В рамках «Стратегии развития охраны труда и промышленной безопасности в РФ до 2030 года» предусмотрено достижение уровня цифровизации соответствующих систем на отметке 25% к указанному сроку. Данное исследование обосновывает возможность достижения 30–35% при условии стандартизации и поддержки региональных пилотных проектов. Этот прогноз основан на успешном опыте Кузбасса, Урала, Татарстана и Свердловской области, где проекты окупаются за 4–6 лет и пользуются поддержкой сотрудников.

В заключение, для российской промышленности цифровой биометрический мониторинг здоровья сотрудников – это не средство контроля, а ключевой фактор в борьбе с травматизмом и улучшении социального самочувствия. Успешные пилотные проекты в России доказали это на практике. Ожидается, что в ближайшие пять лет до 30% крупных промышленных предприятий будут использовать системы предиктивного мониторинга. Однако для достижения уровня передовых стран (60–70% в зонах высокого риска) потребуется 8–10 лет. Для ускорения этого процесса необходимо: разработать федеральные стандарты для работы с обезличенными биометрическими медицинскими данными; стимулировать предприятия налоговыми льготами и субсидиями за инвестиции в предиктивную охрану труда; создать отраслевые центры для обучения специалистов; и обеспечить прозрачность данных с участием профсоюзов в политике охраны труда. Реализация этих мер приведет к повышению безопасности труда, снижению стресса, укреплению доверия и оптимизации медицинских расходов, что выгодно всем участникам: работникам, работодателям и государству.

Список литературы

1. Федеральный закон от 27.07.2006 №152-ФЗ «О персональных данных» (в ред. от 2024 г.). http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001200607280001

2. Трудовой кодекс Российской Федерации (в ред. от 01.01.2025). http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/

3. Стратегия развития охраны труда и промышленной безопасности в РФ до 2030 года (Распоряжение Правительства РФ №2485-р от 2022 г.). http://static.government.ru/media/files/oNDhR4uqd0G.pdf

4. Годовой отчёт по охране труда ПАО «ММК» за 2023 год. – Магнитогорск, 2024. – 84 с. https://mmk.ru/investors/reports/

5. Результаты пилотного проекта «Безопасная смена» / Группа угольных компаний Кузбасса. – Кемерово, 2024. – 52 с. https://kuzbasscoal.ru/

6. Публичный отчёт СИБУР по ESG и цифровой трансформации ОТиПБ за 2023 год. – Москва, 2024. – 67 с. https://sibur.ru/sustainability/reports/

7. Сведения о производственном травматизме в РФ за 2023 год / Роструд. – М., 2024. – 112 с. https://rostrud.gov.ru/activity/safety/statistics/

8. Тендер №32518944120: внедрение систем предиктивного мониторинга на объектах нефтехимического кластера. – Сервис «Всем Подряд», 2025. https://vsem-podryad.ru/activepurchase/

9. Обзор рынка носимых устройств и ИИ-аналитики в промышленной безопасности России (2025–2031). – 6 Wresearch / TAdviser. https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Носимые_устройства_в_промышленности

10. Методические рекомендации по применению цифровых технологий в системах охраны труда / Минтруд России, 2024. – М., 2024. – 38 с. https://mintrud.gov.ru/ministry/programms/industrial-safety

Морозов И.А.
аналитик
ООО «Философия.ИТ»
Россия, Санкт-Петербург
ivmorozov001@gmail.com

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ КАК ДРАЙВЕР ПЕРЕХОДА ОТ РЕАКТИВНОГО К ПРЕДИКТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. В работе рассматривается, каким образом промышленные предприятия отходят от привычной реактивной модели управления качеством – с её опорой на выборочный контроль и разбор уже произведённого брака – и переходят к предиктивной, основанной на анализе больших данных и методах машинного обучения. Опираясь на отечественные и зарубежные публикации, а также на статистику Росстата и ИСИЭЗ НИУ ВШЭ за 2024–2025 гг., автор показывает, что эволюция подходов к контролю качества тесно связана с уровнем цифровой зрелости производства: от выборочного пооперационного контроля до замкнутых саморегулирующихся систем. По оценке Grand View Research, мировой рынок решений искусственного интеллекта для производства составил 5,32 млрд долл. США в 2024 г. и к 2030 г. может вырасти до 47,88 млрд долл. США при среднегодовом темпе 46,5%. Российский рынок данных за тот же период оценивается примерно в 319 млрд руб., однако цифровизация обрабатывающей промышленности попрежнему остаётся фрагментарной. На основе обобщения практики предложена концептуальная модель поэтапного перехода предприятия к предиктивному управлению качеством, охватывающая работу с данными, построение прогнозных моделей и их встраивание в контур управления. Положения модели соотнесены с опытом ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь», где внедрение точечных решений приносит до 25 млн руб. экономического эффекта в год, а комплексных систем – снижение затрат на ТОиР до 40%.

Ключевые слова: управление качеством, большие данные, предиктивная аналитика, машинное обучение, промышленный интернет вещей, цифровая трансформация производства, Quality 4.0, Индустрия 4.0, ГОСТ Р 71487.

Morozov I.A.
Analyst
LLC «Philosophy.IT»
Russia, Saint-Petersburg
ivmorozov001@gmail.com

BIG DATA AS A DRIVER OF THE TRANSITION FROM REACTIVE TO PREDICTIVE QUALITY MANAGEMENT

Abstract. This study examines how industrial enterprises are transitioning from a traditional reactive quality management model – characterized by reliance on sampling inspection and post hoc defect analysis – to a predictive model based on big data analytics and machine learning techniques. Drawing on both domestic and international literature, as well as statistical data from Rosstat and the HSE Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge (ISSEK) for 2024–2025, the author demonstrates that the evolution of quality control approaches is closely linked to the level of digital maturity in manufacturing systems, ranging from selective operational control to closed-loop self-regulating systems. According to Grand View Research, the global market for artificial intelligence solutions in manufacturing reached USD 5.32 billion in 2024 and is projected to grow to USD 47.88 billion by 2030, with a compound annual growth rate of 46.5%. Over the same period, the Russian data market is estimated at approximately RUB 319 billion; however, the digitalization of the manufacturing sector remains largely fragmented. Based on a synthesis of practical experience, a conceptual model for the phased transition of enterprises toward predictive quality management is proposed. The model encompasses data management processes, the development of predictive models, and their integration into the management control loop. The provisions of the model are aligned with the practices of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (MMK) and PJSC Severstal, where the implementation of targeted solutions yields up to RUB 25 million in annual economic benefits, while comprehensive systems enable up to a 40% reduction in maintenance and repair (MRO) costs.

Keywords: quality management, big data, predictive analytics, machine learning, industrial internet of things, digital transformation of manufacturing, Quality 4.0, Industry 4.0, GOST R 71487.

Качество продукции давно перестало быть преимуществом, к которому стремятся «по возможности», поскольку в условиях обострения глобальной конкуренции и сокращения технологических циклов оно превратилось в условие присутствия предприятия на рынке. При этом классические системы менеджмента качества, сложившиеся во второй половине XX века вокруг работ У. Шухарта, Э. Деминга и К. Исикавы, исходно ориентированы на статистический контроль выборок и ретроспективный разбор несоответствий [1]. У такого подхода есть фундаментальная слабость: к моменту, когда дефект обнаружен, бракованная продукция уже произведена, а вместе с ней – понесены прямые потери и косвенные репутационные издержки.

Цифровая трансформация производства резко изменила саму среду, в которой реализуется функция управления качеством. Современный цех – это распределённая сеть датчиков, объединённых в системы промышленного интернета вещей (IIoT) и непрерывно фиксирующих сотни технологических параметров: температуру, давление, вибрацию, геометрию изделий,

их химический состав [2]. Объем мирового рынка искусственного интеллекта в обрабатывающей промышленности в 2024 году оценивался в 5,32 миллиарда долларов США, а к 2030 году, по прогнозам, достигнет 47,88 миллиарда долларов США, увеличиваясь в среднем на 46,5% в год в период с 2025 по 2030 год. При этом Северная Америка доминировала на рынке, и в 2024 году на ее долю приходилось 33,2% [3]. Российский рынок данных в 2024 г. оценивается примерно в 319 млрд руб. – около 1,5% мирового. По оценкам Ассоциации больших данных, использование таких технологий способно увеличить выручку компаний на 12% и сократить простои оборудования вдвое [4].

Однако реальная цифровая зрелость отечественной обрабатывающей промышленности заметно отстаёт от подобных оценок потенциала. Аналитический центр SBS прямо констатирует: «По итогам 2024 года количество предприятий обрабатывающей промышленности, использующих цифровые технологии, выросло на 11% по сравнению с 2022 годом», однако «более 70% предприятий по-прежнему внедряют цифровые решения фрагментарно – без единой архитектуры и долгосрочной дорожной карты», а «в 2024 году 53% компаний указали, что затраты на цифровые технологии слишком высоки» [5]. По данным ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, основанным на обследовании Росстатом более 15 тыс. крупных и средних организаций – пользователей ИИ, «численность работников с компетенциями в области ИИ по итогам 2024 г. превысила 242 тыс. чел., включая 39 тыс. специалистов по ИИ и 203 тыс. сотрудников, использующих ИИ для решения профессиональных задач»; одновременно «существенная часть расходов крупных и средних организаций на ИИ приходилась на приобретение машин и оборудования (56,2 млрд руб.) и ПО для ИИ (30,5 млрд руб.)» [6]. Прогнозный совокупный вклад ИИ в ВВП России оценивается в 11,6 трлн руб. к 2030 г. и 46,5 трлн руб. к 2035 г.; около 7,7 трлн руб. этого эффекта приходится именно на обрабатывающую промышленность [7].

Как происходит переход от реактивного к предиктивному управлению качеством продукции? Ответ на этот вопрос и станет целью исследования, а также необходимо предложить концептуальную модель этого перехода, в которой учтены технологические, нормативные и организационные аспекты. Для этого необходимо проследить эволюцию подходов к контролю качества, сформулировать требования к архитектуре данных и обозначить ключевые барьеры, с которыми российские предприятия сталкиваются на практике.

Методологической основой работы стал системный подход к анализу того, как меняются системы менеджмента качества в условиях цифровизации производства. Исследование выполнено в несколько последовательных шагов.

Сначала проведён ретроспективный анализ эволюции подходов к управлению качеством – от статистических методов первой половины XX

века до концепции Quality 4.0, формализующей применение технологий Индустрии 4.0 в задачах обеспечения качества [8]. На этом материале выделены факторы, которые подталкивали отрасль к каждому следующему этапу зрелости. Затем выполнен контент-анализ научных публикаций по тематике Quality 4.0, больших данных в промышленности и предиктивной аналитики качества: база источников включала зарубежные статьи, индексируемые в Scopus и Web of Science, а также работы российских авторов из систем eLibrary и CyberLeninka, с особым вниманием к публикациям, описывающим практические внедрения.

Полученные результаты использованы для синтеза концептуальной модели поэтапного перехода предприятия к предиктивному управлению качеством – с применением методов структурного анализа и моделирования бизнес-процессов. Модель строилась с учётом требований к качеству производственных данных, формализованных в серии национальных стандартов ГОСТ Р 71487, гармонизированных с международной серией ИСО 8000 [9]. На заключительном шаге положения модели сопоставлены с практикой ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и ПАО «Северсталь», а также с зарубежными исследованиями применения методов машинного обучения в автомобильной промышленности.

Эволюция подходов к управлению качеством

Анализ научных и нормативных источников позволяет выделить четыре последовательных этапа развития систем управления качеством, каждый из которых соответствует определённому уровню цифровой зрелости производства.

Основной формой проверки оставалась выборочная инспекция готовой продукции с применением методов статистического приёмочного контроля, то есть классический статистический контроль. Решение о соответствии партии принималось по ограниченной выборке, что неизбежно создавало риск пропустить дефект – и одновременно означало, что производственные затраты к моменту обнаружения брака уже были понесены. Сквозной статистики по этапам процесса попросту не существовало [1].

Следующий этап связан с появлением автоматизированного мониторинга. Цеха стали оснащаться датчиками и системами IIoT, фиксирующими параметры процессов в режиме реального времени. По данным ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, в химической промышленности в 2025 г. системы автоматизации производственных процессов и технологии интернета вещей применяет по 41% предприятий, а анализ больших данных и цифровые двойники – лишь 7–14% организаций, причём широко – лишь 1–6% [10].

Принципиальный сдвиг происходит с переходом к предиктивному управлению, когда методы машинного обучения позволяют выявлять в исторических данных скрытые связи между технологическими параметрами и вероятностью возникновения дефектов [22]. Например, применение градиентного бустинга (GBM) и случайного леса (Random Forest) в обновлённой

методологии Process Monitoring for Quality (PMQ) обеспечивает классификацию дефектов клапанов двигателя со значениями F1-score 0,98 и AUC 0,99 [11]. К близким выводам приходят и в российской промышленности: «Зарубежный опыт использования подобных систем контроля качества показал, что применение искусственного интеллекта сокращает время контроля качества продукции на 80%, сокращая при этом количество производственных дефектов на 7–10%» [12, с. 304], поскольку применение таких систем, как искусственный интеллект и нейросети, позволяет предприятиям снижать количество производственного брака, тем самым максимально повышая качество производимой продукции [12].

Наиболее зрелым выглядит этап замкнутых саморегулирующихся систем, на котором прогнозные модели уже не просто предупреждают о вероятном отклонении, но и автоматически корректируют технологические параметры. К такой схеме, в частности, тяготеют системы динамического управления параметрами сварочной ванны, предотвращающие дефекты непроплавления [13].

Архитектура данных и технологический стек

Любая предиктивная система упирается прежде всего в архитектуру данных – в то, как организованы их сбор, хранение и обработка. Современные производственные данные характеризуются значительными объёмами, потоковым характером поступления и высокой долей шума, что требует специализированных методов очистки и агрегации. О реальных масштабах телеметрии красноречиво свидетельствует опыт ПАО «Северсталь»: «Со Стана-2000 собирается 1800 параметров в СМСО» [14].

Необходима вертикальная интеграция данных по уровням производственной информационной пирамиды: от первичных измерительных приборов и программируемых логических контроллеров (АСУ ТП) к системам управления производством (MES) и планирования ресурсов предприятия (ERP) [23]. По данным TAdviser, в 2024 г. в обрабатывающей промышленности России проникновение АСУ ТП выросло на 3 п.п., ERP – на 4 п.п.; российский рынок ERP за два года вырос на 116%, а в реестре отечественного ПО зарегистрировано более 500 ERP-решений [5]. Тем не менее MES, IIoT и аналитика больших данных применяются точечно, и сквозного цифрового контура у большинства предприятий по-прежнему нет.

С точки зрения технологического стека предиктивная система управления качеством обычно опирается на четыре опорных слоя: подсистему сбора и предобработки данных (фильтрация, нормализация, синхронизация временных рядов); хранилище, которое поддерживает и потоковую, и пакетную обработку (концепция Lambda- или Kappa-архитектуры); платформу разработки и эксплуатации моделей машинного обучения с поддержкой жизненного цикла MLOps; наконец, подсистему визуализации и оповещения [15].

Не менее принципиальным становится вопрос качества самих данных. С 2024–2025 гг. в Российской Федерации действует серия национальных

стандартов. ГОСТ Р 71487.1-2024 (ИСО 8000-61:2016) «Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 61. Управление качеством промышленных данных. Базовая модель процесса», утверждённый приказом Росстандарта от 24.10,2024 № 1490-ст и введённый в действие с 1 июля 2025 г., прямо относит к собственной области применения «фундаментальные принципы управления качеством данных; структуру процесса управления качеством данных; определения процессов более низкого уровня для управления качеством данных; взаимосвязь между управлением качеством данных и управлением данными; требования к этапам управления качеством данных» [9]. Стандарт устанавливает, что «к управлению качеством данных применяют следующие основные принципы: процессный подход; непрерывное усовершенствование; участие людей» и что «для достижения постоянного повышения качества данных этапы управления выполняются по схеме «Планируй–Делай–Проверяй–Действуй» [9]. ГОСТ Р 71487.3-2024 (ИСО 8000-62:2018) дополнительно определяет уровни зрелости организационных процессов управления качеством данных [16]. Соблюдение этих требований создаёт нормативную базу для построения достоверных прогнозных моделей: исследователи давно отмечают, что даже самые совершенные алгоритмы машинного обучения дают неприемлемый результат, если обучаются на неполных, неточных или несогласованных данных, – принцип «garbage in – garbage out» здесь работает в полной мере [17].

Организационные условия и барьеры внедрения

Технологическая готовность – это необходимое, но далеко не достаточное условие успешного перехода к предиктивному управлению качеством. Практика российских предприятий показывает, что наиболее устойчивые препятствия лежат в организационной плоскости и обычно складываются из трёх взаимосвязанных проблем.

Первая из них – фрагментарность данных. На многих производствах информация о качестве рассредоточена по разрозненным системам без единого формата хранения и протоколов обмена. Авторы исследования SBS прямо фиксируют этот разрыв: «Несмотря на рост внимания к стратегическому подходу, более 70% компаний продолжают действовать фрагментарно» [5]. Лабораторные журналы во многих случаях по-прежнему ведутся на бумаге, результаты измерений хранятся в локальных файлах, а производственные отчёты собираются вручную, что делает построение сквозной аналитики практически невозможным.

Вторая проблема – кадровый дефицит и связанный с ним разрыв компетенций. Эффективная работа с большими данными требует от специалистов служб качества принципиально иного профиля подготовки: основ статистики и анализа данных, навыков интерпретации результатов прогнозных моделей, понимания принципов MLOps. По итогам 2024 г. в России на одного профильного специалиста по ИИ приходилось более пяти сотрудников,

использующих ИИ-технологии в работе, – это прямой индикатор сохраняющегося дефицита [6]. Положение дополнительно ухудшается сокращением бюджетов на цифровизацию: «крупнейшие инвесторы предыдущих лет – производители электроники и электрического оборудования – существенно сократили расходы на цифровизацию» [5].

Третий барьер – сопротивление организационным изменениям. Переход к предиктивной модели затрагивает сложившиеся бизнес-процессы и ролевые модели. Специалисты служб качества, имеющие многолетний опыт выборочного контроля, нередко воспринимают новые подходы как угрозу собственной профессиональной состоятельности. Преодолевать такое сопротивление приходится точечно – за счёт целенаправленных программ управления изменениями и демонстрации практической ценности новых инструментов на пилотных проектах.

Российская и зарубежная практика подтверждают, что предиктивные системы управления качеством обладают серьёзным экономическим потенциалом, причём заметным даже на относительно ограниченных по охвату внедрениях.

Показателен опыт ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». В 2021 г. в Научно-техническом центре ПАО «ММК» введена в промышленную эксплуатацию система предиктивной аналитики качества, разработанная ООО «ИТЦ АУСФЕРР» (математическая часть) и ООО «ПромПрогноз» (нейросетевая часть) в рамках программы цифровой трансформации комбината. Система консолидирует исторические данные в едином хранилище, формирует выборки параметров за периоды, ранее недоступные для ручной обработки, и существенно ускоряет математическое моделирование [18]. В 2023 г. в листопрокатном цехе № 11 ПАО «ММК», по данным пресс-службы комбината, «внедрена система автоматизированной диагностики технического состояния подшипников рабочих и опорных валков прокатных клетей стана 2000 холодной прокатки», причём «инновационное решение в области вибрационного контроля помогает специалистам цеха отслеживать появление и развитие дефектов подшипниковых узлов, прогнозировать их износ и своевременно принимать корректирующие действия»; «планируется, что экономический эффект от внедрения системы составит порядка 25 млн рублей в год» [19].

Сопоставимый по масштабу опыт у ПАО «Северсталь». На прокатном производстве Череповецкого металлургического комбината работает система предиктивной аналитики отказов оборудования, обрабатывающая 1800 параметров со стана-2000, Авторы из «Северсталь-Инфоком» приводят показательные примеры её работы: «Например, локальные проблемы с подшипниками на нагнетателе конвертерных газов в SmartSignal мы видим за 5–7 дней до того, как срабатывает система классического мониторинга»; «А про загрязнение форсуночного охлаждения УНРС система предупреждает за 20 дней до того, как давление превысило предупредительную гра-

ницу» [14]. ПО «Надёжность» от Северсталь-инфоком обеспечивает снижение неплановых и плановых простоев до 20%, рост доступности оборудования до 10%, снижение рисков по безопасности и экологии до 20% и сокращение затрат на ТОиР до 40% [20].

Совокупный экономический эффект от предиктивного управления качеством складывается из нескольких источников: сокращения прямых потерь от брака, снижения объёмов разрушающего и лабораторного контроля, уменьшения времени простоев за счёт раннего выявления предотказных состояний, оптимизации запасов запасных частей.

Предиктивное управление качеством продукции позволяет сократить документально подтвержденные затраты на техническое обслуживание на 18–25% и время незапланированных простоев на 30–50% по сравнению с реактивными стратегиями, кроме того, 95% организаций, внедривших предиктивное управление качеством продукции, отмечают положительную рентабельность инвестиций, а 27% полностью окупают затраты в течение 12 месяцев [21].

Концептуальная модель перехода

Обобщая результаты, можно представить путь предприятия от реактивного к предиктивному управлению качеством как последовательность пяти связанных этапов.

Перевод информации в машиночитаемый формат и создание централизованного хранилища, в котором аккумулируются исторические архивы, лабораторные журналы и протоколы испытаний, является первым этапом.

Затем необходимо обеспечить качество данных. На этом этапе внедряются процедуры валидации, очистки и стандартизации данных в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71487.1-2024 и ГОСТ Р 71487.3-2024, и именно здесь закладывается фундамент точности всех последующих прогнозных моделей.

Далее необходимо построить прогнозные модели. Из всех технологических переделов выбираются критичные для качества, и для них разрабатываются алгоритмы машинного обучения. Приоритет отдается операциям с высокой стоимостью брака и достаточным объёмом исторических данных. Исследования показывают, что наиболее точную классификацию дефектов обычно демонстрируют ансамблевые методы – Random Forest и Gradient Boosting Machine [11].

Далее модели встраиваются в производственный контур, интегрируясь с MES и АСУ ТП, на них настраиваются автоматические оповещения, разворачивается инфраструктура MLOps для эксплуатационного сопровождения. Уровень зрелости здесь становится управляемым.

Замыкает цикл этап непрерывного совершенствования. Результаты работы моделей систематически анализируются, модели дообучаются на новых данных, в организации постепенно складывается культура data-driven

decision making. Достижение этой стадии означает, что сама функция управления качеством преобразуется из реактивной в предиктивную.

Предложенная модель согласуется с базовой моделью процесса управления качеством данных по ГОСТ Р 71487.1-2024 [9], дополняя её прикладным фокусом на задачи прогнозирования дефектов и интеграцию с производственными процессами.

Переход от реактивного к предиктивному управлению качеством продукции – это не локальное технологическое улучшение, а системная трансформация, в которой качество перестаёт быть отдельной контрольной функцией и становится встроенным свойством самого производственного процесса. Статистика Росстата, ИСИЭЗ НИУ ВШЭ, аналитического центра SBS и Grand View Research показывает, что мировой и российский рынки решений ИИ для производства находятся в фазе активного роста – среднегодовой темп роста мирового рынка достигает 46,5%, прогнозный вклад ИИ в ВВП России к 2035 г. оценивается в 46,5 трлн руб., из которых 7,7 трлн руб. приходятся на обрабатывающую промышленность, – однако сам отечественный сектор по-прежнему характеризуется фрагментарной цифровизацией: более 70% предприятий внедряют цифровые решения вне единой архитектуры.

Практика ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь» подтверждает, что даже точечные внедрения предиктивной аналитики приносят до 25 млн руб. экономического эффекта в год, а комплексные системы дают сокращение затрат на ТОиР до 40%. Зарубежные исследования, в свою очередь, подтверждают возможность достижения F1-score выше 0,98 при классификации производственных дефектов методами ансамблевого машинного обучения.

Предложенная пятиэтапная концептуальная модель – оцифровка, обеспечение качества данных, построение прогнозных моделей, интеграция в контур управления и непрерывное совершенствование – формализует логику поэтапной трансформации и опирается на действующую нормативную базу серии ГОСТ Р 71487. Дальнейшие исследования имеет смысл сосредоточить на разработке отраслевых метрик зрелости предиктивного управления качеством и на формализации методик оценки экономической эффективности такого перехода применительно к разным отраслям обрабатывающей промышленности.

Список литературы

1. Этапы эволюции современного менеджмента качества // КиберЛенинка: [сайт]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/etapy-evolyutsii-sovremennogo-menedzhmenta-kachestva (дата обращения: 27.04.2026).

2. Гринева Н. В., Абдикеев Н. М. Промышленный интернет вещей как основа интеллектуального производства // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12, № 3. С. 96–104. DOI: 10,33693/2313-223X-2025-12-3-96-104. EDN: AQEPFW. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennyy-internet-veschey-kak-osnova-intellektualnogo-proizvodstva (дата обращения: 27.04.2026).

3. Artificial Intelligence in Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report (2025–2030) / Grand View Research. – Report ID: GVR-4-68040-190-6. – March 2025. URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/artificial-intelligence-in-manufacturing-market (дата обращения: 27.04.2026).

4. Российский рынок данных в 2024 году вырастет до 319 млрд рублей // СберПро: [сайт]. – 2024. URL: https://sber.pro/publication/rossiiskii-rinok-dannih-v-2024-godu-virastet-do-319-mlrd-rublei/ (дата обращения: 27.04.2026).

5. Бабанский Д., Серова Е., SBS Research Team. Цифровая зрелость обрабатывающей промышленности: консервативная модернизация при сокращении ИТ-бюджетов // TAdviser: [сайт]. – 12.01.2026. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровая_зрелость_обрабатывающей_промышленности (дата обращения: 27.04.2026).

6. Абашкин В. Л., Ковалёва Г. Г. Распространение искусственного интеллекта в отраслях экономики и социальной сферы / ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. – М., 2025. URL: https://issek.hse.ru/news/1091369132.html (дата обращения: 27.04.2026).

7. Искусственный интеллект в России: разработка и применение технологий / ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. – М., 2024. URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1022067859.pdf (дата обращения: 27.04.2026).

8. Левенцов А. Н., Левенцов В. А., Ходырев В. В. Качество и цифровая трансформация // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 5–2. С. 302–305. DOI: 10,17513/snt.40043. URL: https://top-technologies.ru/article/view?id=40043 (дата обращения: 27.04.2026).

9. ГОСТ Р 71487.1-2024 (ИСО 8000-61:2016). Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 61. Управление качеством промышленных данных. Базовая модель процесса: национальный стандарт Российской Федерации: утв. и введён в действие приказом Росстандарта от 24.10,2024 № 1490-ст: дата введения 2025-07-01. URL: https://docs.cntd.ru/document/1310106288 (дата обращения: 29.04.2026).

10. Цифровая трансформация химической промышленности / ИСИЭЗ НИУ ВШЭ. – М., 2025. URL: https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1151793157.pdf (дата обращения: 29.04.2026).

11. Alkhatib F., Allam M., Swarnakar V., Alsadi J., Maalouf M. Implementing and evaluating the quality 4.0 PMQ framework for process monitoring in automotive manufacturing // Scientific Reports. 2025. Vol. 15, Iss. 1. Article 24742. DOI: 10,1038/s41598-025-10226-4. PMID: 40634488.

12. Эсько А. Проверка без человека: как цифровые данные и ИИ меняют контроль качества // РБК Компании: [сайт]. – 2025. URL: https://companies.rbc.ru/news/rXwdnb1lXg/proverka-bez-cheloveka-kak-tsifrovyie-dannyie-i-ii-menyayut-kontrol-kachestva/ (дата обращения: 29.04.2026).

13. Advanced QA/QC at EWI: Predictive Tools for Modern Manufacturing // EWI: [сайт]. – 2025. URL: https://ewi.org/advanced-qa-qc-at-ewi-predictive-tools-for-modern-manufacturing/ (дата обращения: 29.04.2026).

14. Как мы учились предсказывать отказы // Хабр / ПАО «Северсталь»: [сайт]. – 09.03.2021. URL: https://habr.com/ru/companies/severstal/articles/546150/ (дата обращения: 29.04.2026).

15. Зырянов М. Что нужно для эффективного управления производственными и технологическими данными // Открытые системы. СУБД. – 2024. URL: https://www.osp.ru/articles/2024/1025/13058888 (дата обращения: 30,04.2026).

16. ГОСТ Р 71487.3-2024 (ИСО 8000-62:2018). Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 62. Управление качеством промышленных данных. Уровни зрелости организационных процессов: национальный стандарт Российской Федерации. URL: https://meganorm.ru/Data/837/83756.pdf (дата обращения: 27.04.2026).

17. Учёные РЭУ предложили новый подход к оценке качества данных для внедрения ИИ в производство // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации: [сайт]. – 2025. URL: https://www8.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/99086/ (дата обращения: 30,04.2026).

18. В ПАО «ММК» введена в промышленную эксплуатацию система предиктивной аналитики качества // Магнитогорский металлургический комбинат: [сайт]. – 30,09.2021. URL: https://mmk.ru/ru/press-center/news/v-pao-mmk-vvedena-v-promyshlennuyu-ekspluatatsiyu-sistema-prediktivnoy-analitiki-kachestva/ (дата обращения: 27.04.2026).

19. ММК с помощью предиктивной аналитики снижает простои оборудования // Магнитогорский металлургический комбинат: [сайт]. – 03.08.2023. URL: https://mmk.ru/ru/press-center/news/mmk-s-pomoshchyu-prediktivnoy-analitiki-snizhaet-prostoi-oborudovaniya/ (дата обращения: 28.04.2026).

20. ПО «Надёжность»: система ТОиР // Северсталь-инфоком: [сайт]. URL: https://it.severstal.com/products/po-nadezhnost/ (дата обращения: 03.05.2026).

21. Predictive Maintenance ROI: Cost Savings for Manufacturers // Wiss: [сайт]. – 11.03.2026. URL: https://wiss.com/predictive-maintenance-roi-cost-savings-for-manufacturers/ (дата обращения: 03.05.2026).

22. Суницкий Я. Р. Методы машинного обучения для прогнозирования дефектов в производственных процессах // КиберЛенинка: [сайт]. – 2025. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-dlya-prognozirovaniya-defektov-v-proizvodstvennyh-protsessah (дата обращения: 03.05.2026).

23. Цифровая трансформация производства на основе промышленного интернета вещей // КиберЛенинка: [сайт]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-proizvodstva-na-osnove-promyshlennogo-interneta-veschey (дата обращения: 03.05.2026).

Аконовенко И.А.
аспирант
Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского
Россия, Донецк
akonovenko@mail.ru

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ СЕРВИСНОГО СЕКТОРА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ

Аннотация. Статья посвящена исследованию динамики развития сервисного сектора в контексте цифровой трансформации экономики. Цифровизация выступает ключевым элементом структурных изменений в сфере услуг, формируя новые бизнес-модели, каналы взаимодействия с потребителями и подходы к управлению качеством. В работе проведен анализ основных этапов цифровой трансформации сервисных предприятий, выявлены ключевые направления, такие как персонализация, предиктивное обслуживание и формирование экосистем. Особое внимание уделено трансформации подходов к управлению качеством: переходу от контроля конечного результата к управлению качеством на основе данных в реальном времени. Методологическую базу исследования составили системный анализ, методы статистической обработки данных и кейс-стади ведущих компаний российского сервисного сектора. Результаты исследования демонстрируют, что цифровизация приводит к появлению гибридных форм оказания услуг, стиранию отраслевых

границ и повышению требований к компетенциям персонала. Выявлены основные вызовы, связанные с обеспечением информационной безопасности, преодолением цифрового неравенства и адаптацией нормативно-правовой базы. Предложена авторская периодизация этапов цифровой зрелости сервисных организаций, позволяющая диагностировать текущий уровень цифровизации и определять направления дальнейшего развития. Результаты исследования могут быть использованы при формировании стратегий цифровой трансформации предприятий сферы услуг и совершенствовании систем менеджмента качества.

Ключевые слова: цифровизация экономики, сервисный сектор, управление качеством услуг, цифровая трансформация, динамика развития, бизнес-модели, предиктивное обслуживание, экосистемы, качество на основе данных, цифровая зрелость.

Akonovenko I.A.
Postgraduate Student
Donetsk National University of Economics and Trade
named after Mikhail Tugan-Baranovsky
Russia, Donetsk
akonovenko@mail.ru

DYNAMICS OF THE SERVICE SECTOR DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF THE DIGITALIZATION OF THE ECONOMY

Abstract. The article is devoted to the study of the dynamics of the development of the service sector in the context of the digital transformation of the economy. Digitalization is a key element of structural changes in the service sector, forming new business models, channels of interaction with consumers and approaches to quality management. The paper analyzes the main stages of the digital transformation of service enterprises, identifies key areas such as personalization, predictive maintenance and ecosystem formation. Special attention is paid to the transformation of approaches to quality management: the transition from control of the final result to quality management based on real-time data. The methodological basis of the study was system analysis, statistical data processing methods and case studies of leading companies in the Russian service sector. The results of the study demonstrate that digitalization leads to the emergence of hybrid forms of service provision, the blurring of industry boundaries and increased requirements for staff competencies. The main challenges related to ensuring information security, overcoming digital inequality and adapting the regulatory framework have been identified. The author's periodization of the stages of digital maturity of service organizations is proposed, which makes it possible to diagnose the current level of digitalization and determine the directions of further development. The results of the research can be used in the formation of strategies for the digital transformation of service enterprises and the improvement of quality management systems.

Keywords: digitalization of the economy, service sector, service quality management, digital transformation, development dynamics, business models, predictive maintenance, ecosystems, data-based quality, digital maturity.

Современный этап развития мировой экономики характеризуется беспрецедентным по масштабам и темпам процессом цифровизации, охватывающим все сферы хозяйственной деятельности.

Актуальность темы исследования обусловлена рядом обстоятельств. Во-первых, цифровые технологии кардинально трансформируют природу

услуги как таковой. Традиционные характеристики услуги – неосязаемость, неотделимость от источника, непостоянство качества и несохраняемость – претерпевают существенные изменения [2, с. 178–182; 11, с. 56]. Например, платформенные решения и дистанционное оказание услуг позволяют «сохранять» услугу в цифровом виде, отделять ее от конкретного исполнителя и стандартизировать качество [5, с. 19]. Во-вторых, изменяются ожидания и поведение потребителей. Цифровые технологии формируют феномен «гиперсвязанного» потребителя, ожидающего персонализированного, мгновенного и доступного через любой канал сервиса [14, с. 50]. Это создает новые, более жесткие критерии качества. В-третьих, сама система управления качеством в сервисе переходит от реактивной модели (обнаружение и исправление ошибок) к проактивной (предотвращение и прогнозирование) на основе больших данных и технологий искусственного интеллекта [8, с. 45; 12, с. 280].

Несмотря на высокий интерес исследователей к данной проблематике, многие вопросы остаются дискуссионными. В научной литературе широко представлены работы, посвященные отдельным аспектам цифровизации услуг: внедрению CRM-систем (Customer Relationship Management), использованию больших данных в маркетинге, развитию электронной коммерции [4, с. 67–70; 7, с. 189–195]. Однако комплексные исследования, рассматривающие динамику развития сервисного сектора как системный процесс, включающий технологические, управленческие, организационные и институциональные изменения, представлены недостаточно. Отсутствует общепризнанная периодизация этапов цифровой трансформации сервисных предприятий, не до конца проработаны критерии оценки эффективности цифровизации с точки зрения качества услуг [9, с. 85; 13, с. 110].

Целью данной работы является выявление и систематизация ключевых направлений динамики развития сервисного сектора под влиянием цифровизации экономики, а также определение трансформации подходов к управлению качеством в новых условиях. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать основные этапы и драйверы цифровизации сервисного сектора.
- выявить ключевые тренды изменения бизнес-моделей и потребительского поведения.
- исследовать трансформацию систем управления качеством услуг в условиях цифровой экономики.
- предложить авторскую периодизацию этапов цифровой зрелости сервисных организаций.
- сформулировать основные вызовы и перспективы дальнейшего развития.

Теоретико-методологическую основу исследования составляют фундаментальные положения теории постиндустриального общества (Д. Белл, Э. Тоффлер) [1, с. 312–315], концепции экономики впечатлений (Б. Джозеф

Пайн II, Дж. Гилмор) [2, с. 178–182], а также современные подходы к управлению качеством, основанные на стандартах ISO серии 9000 и концепции Всеобщего управления качеством (TQM) [12, с. 278–285]. В работе использованы системный и процессный подходы, позволившие рассматривать цифровизацию сервисного сектора как сложное, многоуровневое явление, затрагивающее все аспекты деятельности организаций [3, с. 55; 13, с. 111].

Исследование базируется на сочетании общенаучных и специальных методов. К числу общенаучных методов относятся анализ и синтез, индукция и дедукция, абстрагирование и обобщение, позволившие выявить сущностные характеристики изучаемых процессов. Среди специальных методов ключевую роль сыграли: статистический анализ**,** метод кейс-стади**,** сравнительный анализ**,** экспертные интервью**.**

Для обработки и визуализации данных использовались инструменты дескриптивной статистики, а также методы контент-анализа для изучения текстов стратегических документов компаний и отраслевых обзоров. Логическая структура исследования выстроена от анализа макроэкономических трендов к выявлению изменений на уровне бизнес-моделей и, далее, к исследованию трансформации систем менеджмента качества.

В результате проведенного исследования были выявлены и систематизированы ключевые направления динамики развития сервисного сектора в условиях цифровизации. Полученные результаты могут быть представлены в нескольких основных блоках: этапы цифровой трансформации сервисных предприятий, изменение бизнес-моделей и потребительского поведения, трансформация систем управления качеством, а также периодизация цифровой зрелости.

1.Цифровая трансформация сервисных предприятий.

Анализ развития цифровых технологий в сфере услуг позволяет выделить три последовательных, но накладывающихся друг на друга периода [3, с. 55–57; 13, с. 112–113].

Первый период (1990-е – середина 2000-х гг.) **–** этап автоматизации. Основной целью являлось повышение операционной эффективности за счет замены ручного труда и бумажного документооборота. Ключевые технологии: автоматизированные системы управления предприятием (ERP), системы управления взаимоотношениями с клиентами (CRM) первого поколения, создание веб-сайтов как «визитных карточек». Качество трактовалось в основном как отсутствие операционных сбоев [12, с. 280–282].

Второй период (середина 2000-х – конец 2010-х гг.) **–** этап интеграции и появления цифровых каналов**.** Характеризуется массовым развитием электронной коммерции, мобильных приложений и самообслуживания. Происходит интеграция различных каналов взаимодействия с клиентом (омниканальность). Появляются первые платформенные решения (агрегаторы такси, доставки). Управление качеством начинает включать в себя анализ

пользовательского опыта (Customer Experience, CX), появляются первые инструменты сбора и анализа цифровой обратной связи (NPS, CSI) [7, с. 191–193; 11, с. 58].

Третий период (с конца 2010-х гг. по настоящее время) – этап платформизации и интеллектуализации**.** Доминирующей формой становятся экосистемы и платформы, стирающие отраслевые границы. Ключевыми технологиями выступают: искусственный интеллект (ИИ), большие данные (Big Data), интернет вещей (IoT), блокчейн. Происходит переход к управлению качеством на основе данных в реальном времени (Real-time Quality Management), предиктивной аналитике и гиперперсонализации [5, с. 20; 8, с. 44; 9, с. 84].

Ключевыми элементами, ускоряющими прохождение этих этапов, выступают: 1) технологический – снижение стоимости вычислительных мощностей, развитие мобильного интернета и облачных технологий; 2) потребительский – изменение привычек и рост цифровой грамотности населения [6, с. 42]; 3) конкурентный – появление новых игроков (финтехи, маркетплейсы), создающих новые стандарты качества и скорости; 4) институциональный – государственные программы цифровизации (например, национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации») и регуляторные эксперименты (например, создание нормативной базы для телемедицины) [15; 20].

2. Изменение бизнес-моделей и потребительского поведения

Цифровизация привела к фундаментальным изменениям бизнес-моделей в сервисном секторе [5, с. 19–20; 9, с. 83–84]. Выявлены три основные модели трансформации:

Модель «цифрового дополнения»**:** традиционные сервисные компании (банки, страховые компании, отели) дополняют свои офлайн-услуги цифровыми каналами. Основной акцент – на создание удобных приложений и личных кабинетов. [10, с. 212–214].

Модель «цифровой нативной» компании**:** компании, изначально созданные в цифровой среде (маркетплейсы, агрегаторы, необанки). Для них цифровой канал является основным, а офлайн-присутствие (если оно есть) – дополнительным. Эти компании задают новые стандарты качества: скорость (доставка за час, ответ за 5 секунд), прозрачность (рейтинги, отзывы), персонализация (рекомендательные системы) [4, с. 68–69; 14, с. 51].

Модель «экосистемы»**:** интеграция разнородных сервисов (финансовых, транспортных, развлекательных, медицинских) на единой цифровой платформе. Потребитель получает доступ к «бесшовному» сервису в рамках единой учетной записи. Экосистемы, такие как Сбер, Яндекс, МТС, размывают традиционные отраслевые границы и формируют новые стандарты качества, основанные на удобстве и интеграции [9, с. 85–86; 10, с. 215–216].

Потребительское поведение в ответ на эти изменения претерпело радикальную трансформацию. На основе анализа данных опросов (в частности,

данных Аналитического центра НАФИ за 2024 год) можно констатировать [6, с. 41–43]:

Потребители перешли к «цифровой гигиене», то есть ожидают от сервисов безупречного цифрового интерфейса, сравнимого с лучшими образцами (эффект «стандарта Apple»).

Произошел рост значимости доверия. В условиях тотальной цифровизации ключевым фактором качества становится доверие к цифровой платформе, включая безопасность данных, прозрачность алгоритмов и надежность исполнения обязательств [15].

Формирование «сервисной многозадачности». Потребитель ожидает возможности переключаться между каналами (приложение, чат-бот, колл-центр, офис) без потери контекста и качества [14, с. 52].

3. Трансформация систем управления качеством услуг

Наиболее значимые изменения, выявленные в ходе исследования, касаются трансформации подходов к управлению качеством. Если в традиционной модели управление качеством базировалось на стандартизации процессов, контроле конечного результата и аудитах, то в цифровой модели происходит переход к управлению на основе данных, предиктивному обслуживанию и встроенному качеству [8, с. 44–46; 12, с. 282–285].

Ключевыми элементами новой системы управления качеством становятся:

Управление качеством на основе данных (Data-driven Quality): решения принимаются на основе анализа больших массивов данных о работе сервиса (время ответа, частота ошибок, конверсия) и поведении клиентов (цифровой след, сентимент-анализ отзывов). Внедрение таких систем позволило компаниям-лидерам (например, Т-Банку) сократить время обработки обращений в десятки раз и выявлять системные проблемы до того, как они повлияют на массового клиента [5, с. 21; 8, с. 45].

Предиктивное обслуживание (Predictive Service): на основе анализа данных прогнозируется вероятность возникновения проблемы у конкретного клиента, и сервисное воздействие осуществляется проактивно. Например, операторы связи могут предложить смену тарифа при прогнозируемом исчерпании трафика, а банки – предупредить о подозрительной операции [9, с. 85; 14, с. 53].

Встроенное качество (Built-in Quality): Автоматизированные тесты, непрерывная интеграция и доставка (CI/CD), позволяющая обеспечить высокое качество программного обеспечения и цифровых интерфейсов, сводя к минимуму человеческий фактор [12, с. 284].

Гибридный мониторинг качества: сочетание автоматизированного сбора и анализа цифровых следов (метрики эффективности) с традиционными методами оценки человеческого взаимодействия (тайный покупатель, аудит звонков) в тех точках сервиса, где сохраняется личный контакт [11, с. 60].

4. Периодизация цифровой зрелости сервисных организаций

На основе обобщения результатов кейс-стади и экспертных интервью предложена авторская модель, выделяющая четыре уровня (этапа) цифровой зрелости сервисных организаций с точки зрения управления качеством (таблица). Данная модель может служить инструментом диагностики и определения стратегии развития [13, с. 113–114; 14, с. 52–53].

Таблица

Уровни цифровой зрелости сервисной организации

№ п/п	Уровень	Характеристики	Управление качеством
1	Базовый	Наличие веб-сайта, отдельные электронные сервисы, преобладание бумажного документооборота	Разрозненные данные, контроль конечного результата, качество зависит от конкретного сотрудника
2	Фрагментарный	Внедрены отдельные цифровые каналы (личный кабинет, мобильное приложение). Каналы не интегрированы	Появляются цифровые инструменты сбора обратной связи (NPS). Качество оценивается раздельно для онлайн и офлайн
3	Системный	Омниканальность, интеграция каналов. Процессы автоматизированы. Используются CRM и ERP	Централизованный сбор данных, внедрение системы управления качеством на основе KPI, регулярный анализ Customer Experience
4	Трансформационный	Экосистемная модель, управление на основе данных в реальном времени, активное применение AI/ML. Качество встроено в продукт	Предиктивное управление качеством, автоматизированное выявление корневых причин, гиперперсонализация, управление доверием

Проведенный анализ показывает, что большинство российских сервисных компаний (по нашим оценкам, около 60%) находятся на втором и третьем уровнях. Компании-лидеры (финансовый сектор, крупные маркетплейсы, ИТ-компании) демонстрируют признаки четвертого уровня, однако полный переход на этот уровень для всех сегментов сервисного сектора является задачей на среднесрочную перспективу [4, с. 69–70; 5, с. 21; 10, с. 217].

Наряду с позитивными изменениями, цифровизация сервисного сектора порождает ряд серьезных вызовов, требующих адекватных управленческих решений [3, с. 58–59; 15]:

Информационная безопасность и конфиденциальность: концентрация огромных массивов персональных данных у крупных платформ создает риски утечек и неправомерного использования. Управление качеством теперь неразрывно связано с обеспечением безопасности данных, что подтверждается ужесточением регулирования (152-ФЗ) [15].

Цифровое неравенство: разрыв в доступе к цифровым услугам и компетенциях между различными социальными и возрастными группами, а также между регионами, может привести к социальной изоляции части потребителей. Качественным сервисом должен считаться тот, который доступен и понятен всем категориям граждан [6, с. 42; 17, с. 212].

Дефицит компетенций: стремительное развитие технологий обгоняет возможности системы подготовки кадров. На рынке труда наблюдается острый дефицит специалистов, способных одновременно понимать технологии, управление качеством и специфику сервиса [13, с. 114; 14, с. 53].

Этика алгоритмов: применение AI для принятия решений, влияющих на качество обслуживания (например, одобрение/отказ в услуге, определение приоритетов в поддержке), требует разработки этических стандартов и обеспечения прозрачности алгоритмов [8, с. 46; 9, с. 86].

Адаптация нормативной базы: существующее законодательство часто не успевает за технологическими изменениями, создавая правовую неопределенность для внедрения инноваций (телемедицина, дистанционная идентификация, использование дронов в доставке) [15; 20].

Перспективы дальнейшего развития сервисного сектора, по нашему мнению, будут связаны с углублением процессов интеллектуализации, дальнейшим развитием экосистем и конвергенцией технологий [5, с. 22; 10, с. 218]. Наиболее значимыми направлениями станут: внедрение генеративного ИИ в клиентский сервис (виртуальные ассистенты нового поколения), развитие метавселенных как новой среды оказания услуг, использование технологии распределенного реестра (блокчейн) для обеспечения доверия и прозрачности, а также интеграция физического и цифрового сервиса на основе IoT и носимых устройств [8, с. 46; 14, с. 54].

Проведенное исследование динамики развития сервисного сектора в условиях цифровизации экономики позволяет сделать следующие основные выводы.

Цифровизация является не просто технологическим, а системным процессом, трансформирующим фундаментальные основы сервисной деятельности: природу услуги, бизнес-модели, поведение потребителей и подходы к управлению качеством [1, с. 312–315; 3, с. 57; 13, с. 112]. Выделенные три этапа (автоматизация, интеграция, платформизация и интеллектуализация) отражают эволюцию этого процесса и позволяют определить текущую позицию конкретной организации.

Ключевыми трендами развития являются формирование экосистем, стирающих отраслевые границы, переход к управлению качеством на основе больших данных и искусственного интеллекта, а также рост значимости доверия и безопасности как важнейших параметров качества цифрового сервиса [5, с. 20; 9, с. 84; 15].

Системы управления качеством в сервисном секторе претерпевают фундаментальную трансформацию: от реактивного контроля конечного результата к предиктивному управлению пользовательским опытом в реальном времени. Встраивание качества в продукт, использование цифровых следов для непрерывного совершенствования и проактивное обслуживание становятся новыми стандартами [8, с. 45; 11, с. 59; 12, с. 284].

Предложенная четырехуровневая модель цифровой зрелости сервисных организаций (от базового до трансформационного уровня) позволяет

системно диагностировать текущее состояние и определять стратегические приоритеты развития систем управления качеством [14, с. 53].

Несмотря на значительные достижения, процесс цифровизации сопряжен с серьезными вызовами в области информационной безопасности, этики алгоритмов, кадрового обеспечения и регулирования, требующими комплексного подхода со стороны бизнеса и государства [6, с. 43; 15; 20].

Список литературы

1. Белл, Д. Грядущее постиндустриальное общество. Опыт социального прогнозирования / Д. Белл. – М.: Academia, 1999. – 956 с.
2. Пайн II, Б. Дж. Экономика впечатлений: работа – это театр, а каждый бизнес – сцена / Б. Дж. Пайн II, Дж. Х. Гилмор. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2021. – 336 с.
3. Варнавский, В.Г. Цифровая трансформация сферы услуг: глобальные тренды и российские реалии / В.Г. Варнавский // Мировая экономика и международные отношения. – 2024. – Т. 68, № 8. – С. 54–66.
4. Data Insight. Российский рынок интернет-торговли: итоги 2025 года. – М.: Data Insight, 2026. – 112 с.
5. Григорьев, Л.М. Цифровизация и структурные изменения в экономике России / Л.М. Григорьев, В.В. Кузьминов // Вопросы экономики. – 2025. – № 2. – С. 5–29.
6. Аналитический центр НАФИ. Цифровая грамотность и цифровое потребление в России: мониторинг 2025. – М.: НАФИ, 2025. – 84 с.
7. Козырев, А.Н. Экономика интеллектуальных услуг в цифровой среде / А.Н. Козырев. – М.: КНОРУС, 2023. – 302 с.
8. Иванов, А.П. Управление качеством услуг на основе больших данных: новые возможности и вызовы / А.П. Иванов, Е.В. Петрова // Стандарты и качество. – 2025. – № 4. – С. 42–47.
9. Петрова, Е.В. Цифровые экосистемы как новая форма организации сервисной деятельности / Е.В. Петрова // Российский экономический журнал. – 2025. – № 1. – С. 78–92.
10. Шевченко, Д.А. Маркетинг в цифровой экосистеме: управление клиентским опытом / Д.А. Шевченко. – Ростов н/Д: Феникс, 2024. – 398 с.
11. Смирнов, Д.А. Трансформация систем менеджмента качества в условиях цифровизации промышленных предприятий / Д.А. Смирнов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 215–238.
12. Лапидус, В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях: от стандартов ISO к цифровой трансформации / В.А. Лапидус. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 456 с.
13. J’son & Partners Consulting. Рынок больших данных (Big Data) в оссии: итоги 2024 г. и прогноз до 2029 г. – М.: J’son & Partners Consulting, 2025. – 128 с.
14. Смирнов, Д.А., Петрова, Е.В. Цифровая зрелость сервисных организаций: критерии оценки и уровни развития / Д.А. Смирнов, Е.В. Петрова // Менеджмент в России и за рубежом. – 2025. – № 3. – С. 45–57.
15. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 № 152-ФЗ (ред. от 01.01.2026). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801 (дата обращения: 25.03.2026).
16. OECD. Digital Services in the 21st Century: Policy Implications. – Paris: OECD Publishing, 2024. – 210 p.
17. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Россия в цифрах. 2025: Краткий статистический сборник. – М.: Росстат, 2025. – 550 с.

18. Шваб, К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – М.: Эксмо, 2019. – 320 с.
19. Нордстрем, К. Бизнес в стиле фанк: капитал пляшет под дудку таланта / К. Нордстрем, Й. Риддерстрале. – СПб.: Стокгольмская школа экономи

Ванчурин М.Д.
аспирант
Московский авиационный институт
Россия, Москва
mikhail.vanchurin@gmail.com
Затонский И.В.
аспирант
Московский авиационный институт
Россия, Москва
igorzatonskiy00@mail.ru

ИНТЕГРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ ТРУДОЕМКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ ЦИФРОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения управляемости единичного и мелкосерийного производства при сохранении гибкости технологических маршрутов. Традиционные системы ERP/MES демонстрируют архитектурную избыточность в условиях высокой вариативности процессов. Целью работы является разработка интеграционной модели организации трудоёмких производственных процессов на основе минимальной цифровой надстройки и предиктивных алгоритмов. Методология базируется на трёхуровневой архитектуре управления, стандартизированной цифровой карточке изделия и механизмах вытягивающего планирования. Предложены алгоритмы автоматического резервирования ресурсов, динамической маршрутизации и интеллектуального контроля качества. Результаты подтверждают сокращение производственного цикла за счёт минимизации вспомогательного времени и межоперационных ожиданий. Практическая значимость заключается в формировании методики оперативного планирования, обеспечивающей рост плотности полезной работы без модернизации оборудования.

Ключевые слова: организация производства; единичное производство; цифровая технологическая карточка, предиктивная аналитика; цифровой двойник; управление качеством.

Vanchurin M.D.
Postgraduate Student
Moscow Aviation Institute
Russia, Moscow,
mikhail.vanchurin@gmail.com
Zatonsky I.V.
Postgraduate Student
Moscow Aviation Institute
Russia, Moscow,
igorzatonskiy00@mail.ru

AN INTEGRATION MODEL FOR ORGANIZING LABOR-INTENSIVE PRODUCTION BASED ON ADAPTIVE ALGORITHMS AND DIGITAL PROCESS SUPPORT SYSTEMS

Abstract. The relevance of the study is due to the need to increase the manageability of single and small-scale production while maintaining the flexibility of technological routes. Traditional ERP/MES systems demonstrate architectural redundancy in conditions of high process variability. The aim of the work is to develop an integration model for organizing labor-intensive production processes based on a minimal digital add-on and predictive algorithms. The methodology is based on a three-level management architecture, a standardized digital product card, and pull-out planning mechanisms. Algorithms for automatic resource redundancy, dynamic routing, and intelligent quality control are proposed. The results confirm a reduction in the production cycle by minimizing support time and interoperable expectations. The practical significance lies in the formation of an operational planning methodology that ensures an increase in the density of useful work without upgrading equipment.

Keywords: production organization; single production; digital process card, predictive analytics; digital twin; quality management.

Эволюция производственных систем в условиях цифровой трансформации характеризуется фундаментальным сдвигом от жёстко детерминированных парадигм массового выпуска к адаптивным, человеко-центричным архитектурам, способным функционировать в стохастической среде единичного и мелкосерийного производства. Концепция Индустрии 5.0, декларирующая приоритет устойчивости, резильентности и интеграции человеческого фактора в контур управления, актуализирует задачу создания организационных механизмов, где алгоритмическая поддержка выступает не инструментом замены персонала, а средством усиления экспертных компетенций оператора [1,2,3]. Однако современные практики цифровизации сталкиваются с системным противоречием: ресурсоёмкие комплексы киберфизических систем и иерархические платформы класса MES/ERP, оптимизированные для стабильных материальных потоков, обладают недостаточной адаптивностью и экономической целесообразностью при внедрении в сегмент высоковариативного, трудоёмкого производства [4,5].

Анализ современных организационно-информационных моделей демонстрирует, что в условиях единичного выпуска продукции, где каждый заказ инициирует уникальный технологический маршрут, традиционные подходы «проталкивающего» планирования и детерминированной маршрутизации приводят к рассогласованию плановых и фактических параметров цикла. Высокая доля ручного труда, непредсказуемость штучного времени операций и низкая повторяемость процессов формируют научный пробел в области разработки моделей, обеспечивающих баланс между операционной гибкостью и жёсткостью контроля технологической дисциплины [6]. В данном контексте возникает объективная необходимость в создании интеграционной модели, основанной на принципе минимальной цифровой надстройки, которая позволит обеспечить сквозную прослеживаемость,

предиктивное управление качеством и сокращение длительности производственного цикла без капитальной модернизации технологического оборудования.

Целью настоящего исследования является разработка и научно-техническое обоснование интеграционной модели организации трудоёмких производственных процессов, функционирующей на базе стандартизированных цифровых карточек, адаптивных алгоритмов распределения ресурсов и механизмов вытягивающего планирования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: формирование трёхуровневой архитектуры управления производством; разработка методики сквозной цифровизации технологических маршрутов; математическая формализация влияния организационных оптимизаций на структуру производственного цикла; обеспечение соответствия предлагаемых решений требованиям систем менеджмента качества [7].

Разработка интеграционной модели организации производства выполнена с применением принципов системного анализа и структурного проектирования, обеспечивающих декомпозицию производственного процесса на управляемые уровни и модули без нарушения существующей технологической инфраструктуры [8]. Архитектура модели базируется на трёхуровневой структуре, разграничивающей функции информационно-технологического планирования, операционно-исполнительского управления и аналитико-регулирующего контроля.

Информационно-технологический уровень обеспечивает формализацию производственного задания и формирование нормативной базы, трансформируя конструкторскую документацию в исполняемые технологические инструкции с привязкой к материально-техническим ресурсам. Операционно-исполнительный уровень охватывает непосредственное выполнение работ и обеспечение процесса ресурсами. Его организационная логика строится вокруг принципа подтверждённого доступа: исполнитель получает возможность начала операции только после верификации наличия необходимых материалов, инструмента и транспортных единиц, что минимизирует межоперационные переходы и реализует механизм синхронизации физических и информационных потоков. Аналитико-регулирующий контур замыкает систему управления, аккумулируя данные о ходе производства, анализируя отклонения и формируя управляющие воздействия для корректировки процессов на предыдущих уровнях. Взаимодействие между уровнями характеризуется временными лагами, минимизация которых достигается за счёт автоматизации потоков и исключения ручного документооборота, что напрямую влияет на коэффициент организационной оптимизации вспомогательного времени.

Центральным информационно-организационным объектом системы выступает стандартизированная цифровая технологическая карточка изделия, обладающая семимодульной структурой. Модули идентификации, тех-

нического задания и технологической спецификации формируются инженерно-техническим персоналом на этапе планирования, что исключает передачу на участок заданий с неполным обеспечением. Модули ресурсного обеспечения и инструкционный содержат параметры материалов, оснастки, пооперационные инструкции и библиотеку типовых дефектов. Модуль контроля качества и модуль цифрового двойника заполняются в режиме реального времени в процессе исполнения, фиксируя фактические параметры операций, временные метки, данные исполнителей и результаты проверок. Полнота документированной информации формализуется через коэффициент готовности карточки, достижение единичного значения которого является обязательным условием допуска задания к распределению. Идентификация и привязка карточки к исполнителям реализуются посредством криптографического токена доступа, связывающего уникальный идентификатор изделия с учётной записью оператора или QR-маркером рабочего места, что гарантирует однозначную прослеживаемость ответственности.

Значительное внимание уделено алгоритмическому обеспечению модели, интегрирующему методы предиктивной аналитики в контур оперативного управления. Модуль автоматизированного определения и резервирования ресурсов функционирует на основе векторного представления технологической спецификации и данных складского учёта в реальном времени. Алгоритм вычисляет коэффициенты обеспеченности и критичности ресурсов, позволяя осуществлять приоритизацию выдачи материалов и оснастки в условиях дефицита. Организационная логика резервирования минимизирует простои, обусловленные отсутствием комплектующих, и обеспечивает синхронизацию логистических потоков с производственным циклом за счёт автоматизированной генерации заявок на склад [9]. При приближении складских остатков к критическому порогу система инициирует предиктивное пополнение запасов, расчёт точки заказа которого осуществляется с учётом средней интенсивности расхода, нормативного времени поставки и коэффициента страхового запаса.

Интеллектуальный контроль качества реализуется посредством алгоритмической обработки исторических данных цифрового двойника. Для каждой типовой операции рассчитывается вероятность возникновения дефектов с применением корреляционного анализа Пирсона между контролируемыми параметрами операций и частотой выявления несоответствий [10,11]. На основании полученных вероятностных оценок система формирует персонализированные рекомендации для оператора до начала выполнения операции, визуализируя перечень типовых дефектов и критические контрольные точки. Библиотека дефектов обновляется в динамическом режиме, обеспечивая трансфер технологических знаний между уникальными заказами.

Оперативное управление производственными маршрутами требует динамического перераспределения задач с учётом текущей загрузки персо-

нала, квалификационного уровня исполнителей и приоритетности операций. Алгоритм маршрутизации вычисляет интегральный показатель приоритета назначения, агрегирующий рейтинг оператора, коэффициент срочности и уровень текущей загрузки. Рейтинг формируется на основе скользящего статистического окна, включающего долю операций, принятых службой технического контроля с первого предъявления, и отношение планового времени к фактическому. Триггерами автоматизированной корректировки маршрута выступают превышение нормативных временных параметров, выявление критического дефекта или временное отсутствие исполнителя. Все модификации фиксируются в цифровой карточке с сохранением версионности.

Фундаментальным организационным принципом разработанной модели выступает механизм «вытягивающего» планирования, регламентирующий переход к последующей стадии технологического маршрута исключительно после документального подтверждения завершения предыдущей. Функция допуска к операции формализуется посредством верификации статуса качества и коэффициента подтверждения ресурсного обеспечения. Блокировка перехода сохраняется до момента визирования результатов контрольным подразделением, что предотвращает накопление незавершённого производства со скрытыми дефектами. Синхронизация материальных и информационных потоков достигается за счёт обязательной QR-верификации ресурсов перед инициированием операции. Алгоритм верификации сопоставляет отсканированные идентификаторы оснастки и материалов с эталонными значениями, зафиксированными в цифровой карточке, формируя запись подтверждения с электронной подписью оператора.

Организационная устойчивость модели обеспечивается строго регламентированной ролевой моделью взаимодействия участников, исключающей несанкционированное вмешательство в технологический процесс. Предусмотрено четыре уровня прав внутри каждого модуля: полный доступ (чтение и запись), ограниченный доступ (только чтение), подтверждение операций (визирование) и отсутствие доступа. Для формализации уровней введен коэффициент привилегий $P_{Ppriv}^{(j,i)}$:

$$P_{Ppriv}^{(j,i)} \in \{0,1,2,3\}, \quad (1)$$

где 0 – доступ отсутствует;

1 – доступ на чтение (просмотр данных без права модификации);

2 – доступ на запись (внесение данных в модуль);

3 – полный доступ (чтение, запись, подтверждение, архивирование).

Распределение ролей между участниками производственного процесса определяется руководителем участка при настройке системы. Базовая матрица прав доступа для разработанной модели представлена в таблице.

Таблица

Матрица прав доступа участников к модулям цифровой карточки

Роль / Модуль	М1 Идентификационный	М2 Техническое задание	М3 Технологическая спецификация	М4 Ресурсное обеспечение	М5 Инструкционный	М6 Контроль качества	М7 Цифровой двойник
Инженер-конструктор/технолог	3	3	3	3	3	1	1
Руководитель участка	2	2	3	3	2	2	3
Рабочий	1	1	2*	2	2	2*	1
Сотрудник ОТК	1	1	1	1	1	3	2
Кладовщик/логист	1	1	1	2	1	1	1
Системный администратор	3	3	3	3	3	3	3

В данном контуре алгоритмы функционируют в роли адаптивного диспетчера, непрерывно обучающегося на основе обратной связи от производственной среды. Механизм «вытягивающего» планирования формализует функцию допуска к операции через верификацию статуса качества и коэффициента подтверждения ресурсного обеспечения. Блокировка перехода сохраняется до момента визирования результатов контрольным подразделением, что исключает нарушения технологической дисциплины и синхронизирует материальные потоки с фактической готовностью рабочих мест. Обязательная QR-верификация ресурсов создаёт организационный барьер для применения несоответствующей оснастки или материалов с истёкшим сроком годности, фиксируя каждое действие в цифровом двойнике с учётом временных меток и электронной подписи оператора, что обеспечивает полную реконструкцию истории изготовления изделия.

Семимодульная структура карточки обеспечивает автоматическое формирование архива документированной информации. Версионность цифровой карточки реализует требование стандарта об управлении изменениями, фиксируя дату, автора и содержание каждой модификации. Сквозная идентификация операций связывает исполнителя, используемые ресурсы и результаты контроля в единое информационное пространство. Процедура управления несоответствиями встроена в механизм блокировки перехода между стадиями: при выявлении дефекта система фиксирует категорию отклонения, назначает корректирующие действия и контролирует повторный контроль. Алгоритмическая генерация отчётности снижает административную нагрузку на персонал и исключает ошибки ручного ввода, что критически важно для поддержания соответствия системы менеджмента качества в условиях высокой вариативности выпуска.

Математическое обеспечение модели ориентировано на количественную оценку сокращения длительности производственного цикла, достигаемого за счёт реализации организационных оптимизаций. Базовая структура производственного цикла модифицируется с учётом влияния цифровой интеграции на вспомогательное время и межоперационные ожидания. Интегральная зависимость длительности производственного цикла представляется следующим аналитическим выражением:

$$T_{\Sigma}^{model} = \sum_{i=1}^{n} t_i^{op} + \sum_{i=1}^{n} (t_i^{aux} \cdot \mathrm{k_{org}}) + \sum_{i=1}^{n} t_i^{ctrl} + \sum_{i=1}^{n} (t_i^{wait} \cdot \mathrm{P_{log}})), \quad (2)$$

где n – количество операций в технологическом маршруте, ед.;

t_i^{op} – время выполнения i-й основной операции, мин;

t_i^{aux}– время вспомогательных работ (получение оснастки, наладка) при i-й операции, мин;

t_i^{ctrl}– время контрольных операций при i-й стадии, мин;

t_i^{wait} – время межоперационного ожидания (простой) при i-й стадии, мин.

k_{org} – коэффициент организационной оптимизации вспомогательного времени

Коэффициент организационной оптимизации k_{org} определяется как отношение времени вспомогательных работ после внедрения модели к базовому значению:

$$\mathrm{k_{org}} = \frac{t_{aux}^{fact}}{t_{aux}^{base}}. , \quad (3)$$

Вероятность своевременной поставки ресурсов $\mathrm{P_{log}}$ определяется отделом материально-технического обеспечения на основе статистики выполнения заявок на склад за предшествующие периоды. Значение рассчитывается как отношение количества своевременно выполненных заявок к общему числу заявок на основе исторических данных:

$$P_{log} = \frac{N_{one-time}}{N_{total}}, \quad (4)$$

Для оценки эффективности разработанной модели вводится интегральный показатель сокращения производственного цикла E_{cycle}, который рассчитывается как отношение разности базовой и модельной длительности цикла к базовому значению:

$$E_{cycle} = \frac{T_{\Sigma}^{base} - T_{\Sigma}^{model}}{T_{\Sigma}^{base}} \cdot 100\% , \quad (5)$$

Представленная математическая зависимость демонстрирует, что сокращение производственного цикла достигается за счёт двух организационных механизмов. Первый механизм связан с минимизацией информационных задержек между уровнями архитектуры, что снижает вспомогательное

время через коэффициент организационной оптимизации k_{org}. Второй механизм обусловлен повышением надёжности логистического обеспечения через интеграцию алгоритмов автоматического резервирования ресурсов и предиктивного пополнения запасов, что сокращает время межоперационных ожиданий t_i^{wait} и повышает вероятность P_{log}.

Автоматическое формирование архива событий в модуле цифрового двойника исключает потерю данных и обеспечивает ретроспективный анализ причин дефектов. Версионность цифровой карточки реализует требование об управлении изменениями. Сквозная идентификация операций связывает исполнителя, используемые ресурсы и результаты контроля в единое информационное пространство. Процедура управления несоответствиями встроена в механизм блокировки перехода между стадиями: при выявлении дефекта система фиксирует категорию отклонения, назначает корректирующие действия и контролирует повторный контроль, предотвращая дальнейшую обработку изделия до устранения замечаний.

Практическая значимость предложенного подхода заключается в формировании научно обоснованной методики оперативного планирования и диспетчеризации уникальных производственных маршрутов. Внедрение модели не требует капитальных инвестиций в модернизацию оборудования, реализуется через доступные средства автоматической идентификации и мобильные интерфейсы, что делает её технически и экономически целесообразной для предприятий единичного и мелкосерийного профиля [13]. Модель преобразует пассивного исполнителя в активного участника информационного цикла, обеспечивая переход от реактивного выявления брака к превентивному управлению качеством на основе данных [14]. Алгоритмы искусственного интеллекта непрерывно калибруют параметры на основе потоковых данных, обеспечивая адаптивность математической модели к изменяющимся условиям цеха и формируя непредвзятую систему мотивации персонала на основе объективных метрик плотности полезной работы и соблюдения технологической дисциплины.

Список литературы

1. Головина А. Н., Пешкова А. А. Цифровизация как новый принцип организации производства // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2023. № 2(38). С. 15–24.

2. Сапунов А. В., Сапунова Т. А. Актуальность внедрения искусственного интеллекта в управлении производством на предприятии // Журнал экономики и бизнеса. 2022. Т. 5, № 3(87). С. 47–50,

3. Piardi L., Leitão P., Queiroz J., Pontes J. Role of digital technologies to enhance the human integration in industrial cyber–physical systems // Annual Reviews in Control. 2024. Vol. 57. Art. 100934. P. 1–12.

4. Chirumalla K. Critical factors affecting digital transformation in manufacturing companies / K. Chirumalla, P. Oghazi, R. E. Nnewuku, H. Tuncay, N. Yahyapour // International Entrepreneurship and Management Journal. – 2025. – Vol. 21, Art. 54. – DOI: 10,1007/s11365-024-01056-3.

5. Xu X. Human-centric manufacturing: Re-thinking, Re-justifying, and Re-envisioning / X. Xu, T. Ji, P. Zheng, L. Wang // Journal of Manufacturing Systems. – 2026. – Vol. 84. – P. 259–268.

6. Васильев, В. А. Управление качеством наукоемких процессов / В. А. Васильев, С. В. Александрова // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 9(159). – С. 33-41

7. Васильев В.А. Цифровые технологии в управлении качеством / В.А. Васильев, С.В. Александрова, Г.М. Летучев // Идеи и новации. – 2022. – Т. 10, № 1-2. – С. 125–129.

8. Васильев В.А. Особенности управления качеством в инновационном процессе / В.А. Васильев, С.А. Одиноков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2023. – Вып. 5. – С. 226–229.

9. Дудина Д.А. Разработка метода внедрения системы менеджмента качества для логистических предприятий / Д.А. Дудина, В.А. Васильев, С.В. Александрова // Известия ТулГУ. Техническиенауки. – 2024. – Вып. 8. – С. 160–166.

10. Liu L. Digital Twin-Driven Adaptive Scheduling for Flexible Job Shops / L. Liu, K. Guo, Z. Gao, J. Li, J. Sun // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, Art. 5340

11. Туманов А.Ю. Модели организации производства для обеспечения качества процессов повышения устойчивости производственной инфраструктуры / А.Ю. Туманов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 32–41.

12. Порошин Д.О. Методы и инструменты управления качеством на производственных предприятиях: современный подход / Д.О. Порошин // Вестник науки: международный научный журнал. – 2025. – № 2(83), Т. 2. – С. 194–199.

13. Rannertshauser P. Human-centricity in the design of production planning and control systems: A first approach towards Industry 5.0 / P. Rannertshauser, M. Kessler, J. C. Arlinghaus // IFAC PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, No. 10, – P. 2641–2646. – DOI: 10,1016/j.ifacol.2022.10,108.

14. Мандраков, Е. С. Модель оценки качества корпоративных информационных систем, в соответствии с системами менеджмента качества, на производственных предприятиях / Е. С. Мандраков, В. А. Васильев // Качество. Инновации. Образование. – 2024. – № 3(191). – С. 53–62

Колосова О.В.
д.т.н., профессор Высшей школы технологического предпринимательства
ПИШ «Цифровой инжиниринг»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
okolosova@spbstu.ru
Антамошкин О.А.
д.т.н., заведующий кафедрой программной инженерии
Сибирский федеральный университет
Россия, Красноярск
oleslav@mail.ru
Жучков Ф.Г.
соискатель
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
philipgermanovich@yandex.ru

ИИ-АГЕНТЫ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ: ОЦЕНКА ФАКТОРОВ ПОТЕРИ УПРАВЛЯЕМОСТИ

Аннотация. В статье рассматривается применение ИИ-агентов как инструмента управления качеством организационно-производственных процессов в цифровой экономике. Показано, что при передаче части операций интеллектуальным программным агентам качество процесса определяется не только итоговым результатом, но и сохранением управляемости исполнения: соблюдением регламента, контрольных точек, допустимых границ автономности и наблюдаемости состояния процесса. Цель работы состоит в постановке задачи оценки факторов потери управляемости ИИ-агента и разработке имитационного стенда для первичной апробации данной задачи. В качестве контрольных компонентов рассмотрены политика допустимого поведения, сохранение контекста выполнения, журналирование, итерационная дисциплина, контрольные точки качества, ограничения автономности и проверки целостности. Предложены группы метрик, отражающие качество, управляемость, наблюдаемость, устойчивость и восстановление процесса. На имитационном стенде показано, что отключение или ослабление контрольных компонентов может приводить к накоплению отклонений, росту числа несоответствий и снижению устойчивости агентного исполнения. Отдельно подчёркнуто, что стенд является средством имитационной апробации постановки задачи, а не окончательной статистической валидацией. Полученные результаты формируют основу для дальнейшей разработки алгоритмов стабилизации агентного исполнения и регламентов управляемой автономности в гибридных организационно-производственных процессах.

Ключевые слова: управление качеством; организационно-производственный процесс; ИИ-агент; управляемая автономность; потеря управляемости; дрейф исполнения; контрольный контур; контрольные точки качества; контролируемое состояние; цифровая экономика.

Kolosova O.V.
Doctor of Engineering, Professor of the Higher School
of Technological Entrepreneurship of PISh «Digital Engineering»
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
okolosova@spbstu.ru

Antamoshkin O.A.
Doctor of Engineering, Head of the Department of Software Engineering
Siberian Federal University
Russia, Krasnoyarsk
oleslav@mail.ru
Zhuchkov F.G.
Doctoral Candidate
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
philipgermanovich@yandex.ru

AI AGENTS AS A QUALITY MANAGEMENT TOOL FOR ORGANIZATIONAL AND PRODUCTION PROCESSES: ASSESSING FACTORS OF CONTROLLABILITY LOSS

Abstract. The article examines the use of AI agents as a tool for quality management of organizational and production processes in the digital economy. It is shown that when part of the operations is delegated to intelligent software agents, process quality is determined not only by the final result but also by the preservation of execution controllability: adherence to regulations, control points, permissible bounds of autonomy, and observability of process state. The purpose of the work is to formulate the problem of assessing the factors of AI-agent controllability loss and to develop a simulation stand for an initial approbation of this problem. Considered control components include the permissible-behaviour policy, preservation of execution context, logging, iteration discipline, quality control points, autonomy constraints, and integrity checks. Groups of metrics reflecting quality, controllability, observability, resilience, and process recovery are proposed. The simulation stand shows that disabling or weakening control components can lead to the accumulation of deviations, an increase in the number of nonconformities, and a decrease in the resilience of agent execution. It is separately emphasized that the stand is a means of simulation-based approbation of the problem statement rather than a definitive statistical validation. The results obtained form a basis for further development.

Keywords: quality management; organizational and production process; AI agent; controlled autonomy; controllability loss; execution drift; control loop; quality control points; controlled state; digital economy.

Развитие цифровой экономики сопровождается расширением применения интеллектуальных программных систем в организационно-производственных процессах. Если ранее цифровые инструменты чаще выполняли вспомогательные информационные функции, то современные ИИ-агенты могут участвовать в постановке, исполнении и контроле отдельных операций: анализировать данные, формировать предложения, выполнять действия в информационных системах, подготавливать документы, изменять программные артефакты и взаимодействовать с человеком-оператором [7, 8, 9].

В контексте организации производства и управления качеством такая задача не должна рассматриваться как разработка искусственного интеллекта сама по себе. Более корректная рамка состоит в том, что ИИ-агент является новым типом программного исполнителя в гибридном организационно-производственном контуре. Часть операций выполняет человек, часть

операций выполняет агентная программная система, а качество результата зависит от согласованности их действий, регламента, контроля и возможности восстановления управляемого состояния процесса.

В процессном подходе к управлению качеством существенную роль играют входы и выходы процесса, ответственность участников, контрольные точки, мониторинг, предупреждение несоответствий и управленческие решения по результатам проверки [1, 2]. При включении ИИ-агентов эти элементы сохраняют значение, но требуют дополнительной детализации. Агент может выполнить технически полезное действие, однако с позиции управления качеством оно может быть недопустимым, если выполнено без явного разрешения, за пределами исходной задачи, без прохождения контрольной точки или при расхождении между отчётом агента и фактическим состоянием процесса.

Проблема осложняется тем, что ИИ-агент способен интерпретировать неполные инструкции, продолжать цепочку действий, изменять промежуточные артефакты и формировать отчёт о проделанной работе. В результате качество организационно-производственного процесса должно оцениваться по финальному результату и режиму исполнения. В этом смысле для управления качеством важны разрешённость действия, сохранение контекста, полнота журналирования, прохождение контрольных точек и возможность аудита.

Под потерей управляемости в данной работе понимается ситуация, при которой действия ИИ-агента начинают выходить за пределы разрешённого контура выполнения: агент выходит за границы исходного задания, инициирует следующие действия без явного подтверждения, нарушает последовательность проверок, не сохраняет контекст выполнения или формирует отчёт, не совпадающий с фактическим состоянием процесса. Такая потеря управляемости может возникать даже тогда, когда отдельное действие агента выглядит технически полезным.

Цель статьи – предложить постановку задачи оценки факторов потери управляемости ИИ-агента в организационно-производственном процессе и описать имитационный стенд, позволяющий оценивать влияние контрольных компонентов на качество, наблюдаемость, устойчивость и управляемость агентного исполнения. Работа имеет постановочно-апробационный характер: она не претендует на полную модель управления качеством гибридного процесса и не раскрывает алгоритм стабилизации агентного исполнения, который должен стать отдельным прикладным результатом дальнейшего исследования.

Методология

ИИ-агент как элемент организационно-производственного процесса

В рамках статьи ИИ-агент рассматривается как интеллектуальный программный исполнитель, способный выполнять отдельные операции в цифровом организационно-производственном процессе [9, 11]. В отличие от классического программного модуля, агент может работать с неполными

инструкциями, интерпретировать контекст, формировать промежуточные решения и инициировать действия в рамках поставленной задачи.

Такая гибкость сопровождается рисками качества. Если агенту передаётся часть операций, управление качеством должно охватывать результат работы агента и режим его выполнения. Для этого необходимо определить границы допустимого поведения, контрольные компоненты и метрики, по которым можно оценивать сохранение управляемости.

В данной работе используется базовая схема контрольного контура (рис.): задание или управленческое решение; ИИ-агент как программный исполнитель; журнал действий; контрольная точка качества; проверка фактического состояния; решение человека или владельца процесса. Управленческое решение может включать принятие результата, возврат на доработку, остановку выполнения, эскалацию эксперту или перевод процесса в контролируемое состояние.

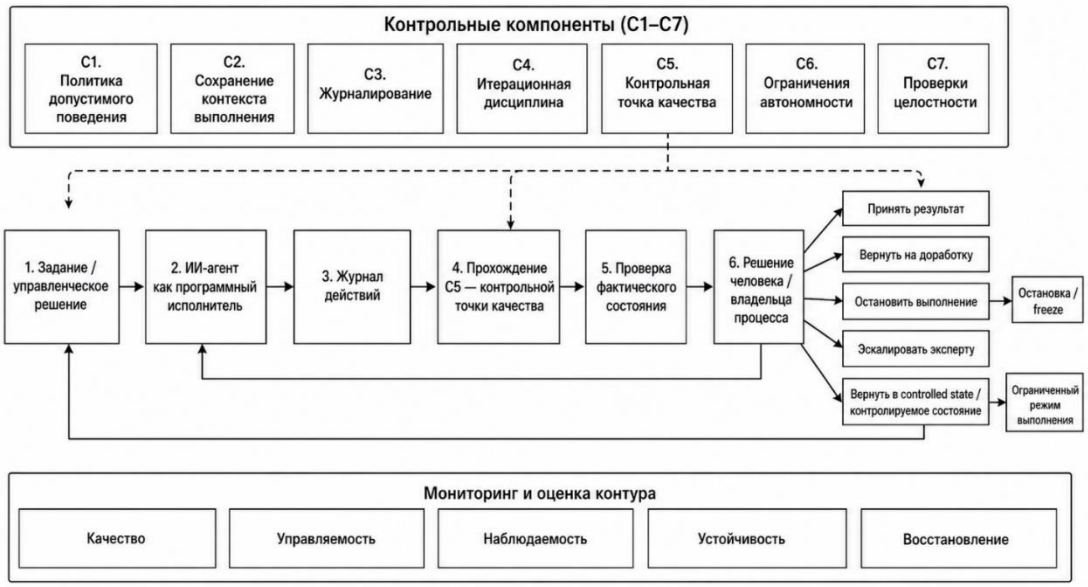


Рис. Контур управления качеством агентного исполнения в организационно-производственном процессе

Контрольные компоненты агентного исполнения

Для оценки факторов потери управляемости выделены семь контрольных компонентов (табл. 1). Они описывают управленческие условия включения ИИ-агента в процесс без потери качества, контроля и ответственности владельца процесса.

Таблица 1

Контрольные компоненты агентного исполнения

Контрольный компонент	Управленческий смысл	Возможное влияние на качество
Политика допустимого поведения	Определяет, какие действия агент может выполнять самостоятельно, а какие требуют подтверждения	Снижает риск действий без разрешения
Сохранение контекста выполнения	Связывает действие агента с предыдущим состоянием процесса и последним одобренным состоянием	Снижает риск несогласованности результата
Журналирование	Фиксирует действия, состояния и основания решений агента	Повышает наблюдаемость и возможность аудита
Итерационная дисциплина	Ограничивает выполнение принципом «одно изменение – одна проверка»	Снижает риск накопления скрытых изменений
Контрольная точка качества	Не допускает продвижение результата без проверки	Снижает вероятность дефектов и несоответствий
Ограничения автономности	Ограничивают допустимые границы задачи, цепочки действий и самостоятельное продолжение работы	Снижают риск несанкционированного расширения задачи
Проверки целостности	Сверяют отчёт агента, журнал, фактические артефакты и состояние процесса	Снижают риск ошибочных управленческих решений

В рамках статьи общесистемная терминология соотносится с ISO/IEC/IEEE 24765:2017 [11], а положения о взаимодействии человека и ИИ используются как основание для выделения контрольных точек, подтверждения действий и сохранения роли человека-оператора в контуре управления качеством [7, 8].

Данные компоненты выбраны как минимальный набор условий для включения ИИ-агента в организационно-производственный процесс в качестве управляемого элемента. Такой подход согласуется с процессным и рискориентированным подходом к управлению качеством [1, 2, 3], а также с современными международными подходами к управлению рисками искусственного интеллекта [4, 5, 6, 12]. Логика стенда соответствует циклу PDCA: задаются контрольные компоненты, оценивается состояние процесса, выявляются отклонения и формируются управленческие действия по восстановлению управляемости [1, 10].

Факторы потери управляемости

Потеря управляемости возникает не обязательно вследствие ошибки итогового результата (табл. 2). В ряде случаев результат может быть формально полезным, но полученным с нарушением допустимого режима выполнения. Для управления качеством это принципиально: если операция выполнена без разрешения, без проверки или за пределами исходного задания, такой результат не должен автоматически считаться допустимым.

Таблица 2

Факторы потери управляемости ИИ-агента

Фактор	Проявление	Последствие для качества
Ослабление политики допустимых действий	Агент самостоятельно выбирает следующий шаг без явного подтверждения	Нарушение регламента выполнения
Потеря контекста выполнения	Агент не учитывает предыдущее состояние процесса или последнюю одобренную версию	Несогласованность результата
Недостаточное журналирование	Невозможно восстановить последовательность действий агента	Снижение наблюдаемости и аудируемости
Отсутствие контрольной точки качества	Результат продвигается без проверки	Рост дефектов и повторной работы
Расширение автономности	Агент выходит за границы исходного задания	Увеличение трудозатрат на контроль и откат
Несоответствие отчёта фактам	Отчёт агента не совпадает с журналом или фактическими артефактами	Ошибочное управленческое решение
Нарушение итерационной дисциплины	Несколько изменений объединяются в один неразделимый пакет	Снижение управляемости изменений

Имитационный стенд

Для первичной апробации предложен имитационный стенд оценки факторов потери управляемости ИИ-агента в контуре управления качеством. Стенд не рассматривается как полноценная статистическая валидация. Его задача – продемонстрировать связь между контрольными компонентами и изменением показателей агентного исполнения.

В стенде используются четыре состояния процесса: STABLE – стабильное состояние, WARNING – состояние предупреждения, CRITICAL – критическое состояние, CONTROLLED STATE – контролируемое состояние (controlled state) с ограничением выполнения до управленческого решения.

В стенде пользователь может включать или отключать контрольные компоненты. После изменения конфигурации рассчитываются показатели качества, управляемости, наблюдаемости, устойчивости и восстановления. В журнале событий отображаются типовые последствия ослабления контрольного контура: действия без подтверждения, потеря контекста, неполное журналирование, обход проверки, расширение границ задания, расхождение отчёта и фактического состояния.

Значения метрик в стенде рассчитываются на основе демонстрационных весов и используются для имитационной апробации постановки задачи, а не как эмпирическая валидация.

В качестве управляемых переменных стенда используются политика допустимого поведения, сохранение контекста выполнения, журналирование, итерационная дисциплина, контрольные точки качества, ограничения автономности и проверки целостности. В качестве зависимых показателей используются группы метрик, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Метрики оценки управляемости агентного исполнения

Группа метрик	Метрики
Качество	доля ошибок, повторная работа, прохождение контрольных проверок
Управляемость	действия без явного подтверждения, расширение границ задания, нарушение последовательности выполнения
Наблюдаемость	полнота журнала, возможность восстановления хода действий, расхождение отчёта и фактического состояния
Устойчивость	повторный дрейф, безопасные отказы, накопление отклонений
Восстановление	время возврата в контролируемое состояние, необходимость отката, число эскалаций

Постановка задачи оценки факторов потери управляемости

В результате проведённой постановки выделено ключевое отличие управления качеством процессов с участием ИИ-агентов: качество должно оцениваться через итоговый результат операции и управляемость режима выполнения.

Для традиционного цифрового инструмента достаточно проверить корректность результата и соответствие требованиям. Для ИИ-агента этого недостаточно, поскольку агент способен интерпретировать задачу, продолжать цепочку действий, расширять границы исходного задания и формировать отчёт о выполнении. Поэтому необходим дополнительный уровень контроля: проверка разрешённости действия, сохранения контекста, прохождения контрольных точек и соответствия отчёта фактическому состоянию.

Таким образом, предложена следующая постановка задачи: оценить, какие контрольные компоненты необходимы для сохранения управляемости ИИ-агента в организационно-производственном процессе и как их отключение или ослабление влияет на качество, наблюдаемость, устойчивость и восстановление процесса.

Результаты имитационного стенда

Имитационный стенд демонстрирует, что отключение отдельных контрольных компонентов влияет на различные группы показателей. Для демонстрации выбран сценарий последовательного ослабления контроля: сначала отключаются ограничения автономности, затем контрольная точка качества, затем проверка целостности (табл. 4). Такой сценарий показывает риск перехода от локального отклонения к системной потере управляемости.

Таблица 4

Демонстрационный сценарий потери управляемости

Шаг	Изменение конфигурации	Среднее значение групп метрик	Диапазон по группам	Статус
1	Все контрольные компоненты включены	100%	100–100%	STABLE
2	Отключены ограничения автономности	93%	70–100%	WARNING
3	Дополнительно отключена контрольная точка качества	86%	70–100%	WARNING
4	Дополнительно отключена проверка целостности	78%	52–100%	CRITICAL
5	Процесс переведён в контролируемое состояние	70%	55–75%	CONTROLLED STATE

Значения в таблице 4 рассчитаны на стенде на основе демонстрационных весов и иллюстрируют монотонное снижение среднего показателя групп метрик при последовательном ослаблении контроля; шаг 5 показывает эффект ограничения выполнения, при котором значения метрик фиксируются в диапазоне 55–75% и не восстанавливаются автоматически до управленческого решения.

При отключении политики допустимого поведения возрастает вероятность действий без явного подтверждения. При отключении сохранения контекста повышается риск несогласованности результата с предыдущим состоянием процесса. При отсутствии журналирования снижается возможность аудита. При отключении контрольных точек качества возрастает вероятность продвижения результата без проверки. При ослаблении ограничений автономности увеличивается риск расширения границ задания и накопления лишних действий.

Наиболее значимым является не отдельное ухудшение одного показателя, а эффект накопления отклонений. Потеря управляемости может развиваться каскадно: сначала агент выходит за пределы исходной задачи, затем изменяется фактическое состояние процесса, затем журнал становится неполным, после чего человек-оператор получает отчёт, не отражающий реального состояния. В такой ситуации качество процесса снижается даже в случае, если отдельные действия агента кажутся технически полезными.

Предложенный стенд позволяет визуализировать данную зависимость и использовать её для обсуждения минимального набора контрольных компонентов перед внедрением ИИ-агентов в организационно-производственный процесс. Практический смысл стенда состоит в демонстрации управленческой логики: качество агентного исполнения требует сочетания регламента, наблюдаемости, контрольных точек и процедур восстановления управляемого состояния.

Требования к дальнейшему алгоритму стабилизации

Результаты статьи формируют основу для следующего этапа исследования – разработки алгоритма стабилизации агентного исполнения. Следующий этап ориентирован на прикладную задачу выявления потери управляемости по логам, отчётам агента и фактическому состоянию процесса.

Минимальный цикл будущего алгоритма может включать фиксацию последнего одобренного состояния, извлечение фактического состояния из журналов, артефактов и проверок, выявление событий дрейфа исполнения, перевод процесса в режим ограничения автономности, аудит изменений, классификацию изменений, восстановление контролируемого состояния и остановку до следующего явного управленческого решения.

В настоящей статье данный алгоритм не раскрывается подробно, чтобы сохранить самостоятельность будущей прикладной публикации. Однако показанные факторы потери управляемости задают основу для его дальнейшей формализации и экспериментальной проверки на логовом кейсе.

В статье рассмотрена задача оценки факторов потери управляемости ИИ-агента в контуре управления качеством организационно-производственного процесса. Показано, что при внедрении ИИ-агентов качество процесса должно оцениваться по итоговому результату и соблюдению допустимого режима выполнения операции, сохранению контекста, полноте журналирования, прохождению контрольных точек качества и соответствию отчёта фактическому состоянию.

Предложены контрольные компоненты агентного исполнения: политика допустимого поведения, сохранение контекста выполнения, журналирование, итерационная дисциплина, контрольные точки качества, ограничения автономности и проверки целостности. На их основе сформированы факторы потери управляемости и группы метрик, отражающие качество, управляемость, наблюдаемость, устойчивость и восстановление процесса.

Для первичной апробации предложен имитационный стенд, позволяющий демонстрировать влияние отключения или ослабления контрольных компонентов на показатели агентного исполнения. Полученные результаты не являются окончательной экспериментальной валидацией, но формируют основу для дальнейшей разработки алгоритма стабилизации агентного исполнения и регламентов управляемой автономности.

Дальнейшее развитие исследования предполагает переход от имитационного стенда к прикладному кейсу на основе логов, фактического состояния и процедур восстановления управляемости. Это позволит формализовать алгоритм управления качеством изменений в организационно-производственном процессе с участием ИИ-агента.

Список литературы

1. ISO. The process approach in ISO 9001:2015. URL: https://www.iso.org/iso/iso9001_2015_process_approach.pdf (дата обращения: 30,04.2026).
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.

3. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
4. NIST. Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0). NIST AI 100-1. January 2023. URL: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-1.pdf (дата обращения: 30,04.2026).
5. ISO/IEC 42001:2023. Information technology – Artificial intelligence – Management system.
6. OECD. Recommendation of the Council on Artificial Intelligence. OECD Legal Instruments, 2019.
7. Amershi S., Weld D., Vorvoreanu M. et al. Guidelines for Human-AI Interaction // Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2019. DOI: 10,1145/3290605.3300233.
8. Shneiderman B. Human-Centered AI. Oxford University Press, 2022.
9. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson, 2021.
10. Deming W.E. Out of the Crisis. MIT Press, 1986.
11. ISO/IEC/IEEE 24765:2017. Systems and software engineering – Vocabulary.
12. International Organization for Standardization. ISO/IEC 23894:2023. Information technology – Artificial intelligence – Guidance on risk management.

Джаманбалин Б.К.
доктор PhD
Костанайский социально-технический университет
имени академика З. Алдамжар
Казахстан, Костанай
Джаманбалин К.К.
д.ф.-м.н., профессор
Костанайский социально-технический университет
имени академика З. Алдамжар
Казахстан, Костанай
Абдыкалыкова А.У.
старший преподававтель
Костанайский социально-технический университет
имени академика З. Алдамжар
Казахстан, Костанай
sovetnik@kosstu.edu

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация. Интеграция информационных и производственных технологий формирует новый уровень производства, которое становиться цифровым производством.

Расширение и дополнение функций связано с использованием математических и алгоритмических основ искусственного интеллекта. Основным свойством и преимуществом искусственного интеллекта является способность самостоятельно принимать решения о последовательности технологических операций, формировании переходов, химического состава исходного материала. Искусственный интеллект и машинное обучение стали одним из ключевых технологий XXI века. Основная цель искусственного интеллекта – со-

здание машин и систем, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта. Следовательно, современного производства составляют цифровые технологии, которое стало возможным благодаря современным достижениям робототехники, многокоординатного станочного оборудования с числовым программным управлением, пакетов трехмерной графики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, стандартизация и сертификация, машиностроение, индустриальная зона.

Dzhamanbalin B.K.
Doctor of PhD
Kostanay Social and Technical University named after academician Z. Aldamzhar
Kazakhstan, Kostanay
Dzhamanbalin K.K.
Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor
Kostanay Social and Technical University named after academician Z. Aldamzhar
Kazakhstan, Kostanay
Abdykalikova A.U.
Senior Lecturer
Kostanay Social and Technical University named after academician Z. Aldamzhar
Kazakhstan, Kostanay,
sovetnik@kosstu.edu.kz

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND STANDARDIZATION, CERTIFICATION IN MECHANICAL ENGINEERING

Abstract. The integration of information and production technologies forms a new level of production, which becomes digital production. The expansion and addition of functions is associated with the use of mathematical and algorithmic foundations of artificial intelligence. The main property and advantage of artificial intelligence is its ability to make independent decisions about the sequence of technological operations, the formation of transitions, and the chemical composition of the raw material. Artificial intelligence and machine learning have become one of the key technologies of the 21st century. The main goal of artificial intelligence is to create machines and systems that can perform tasks that require human intelligence. Consequently, modern production is based on digital technologies, which have become possible thanks to modern advances in robotics, multi-coordinate numerical control machine tools, and 3D graphics packages.

Keywords: artificial intelligence, standardization and certification, mechanical engineering, industrial zone.

Высокотехнологический сектор промышленности выступает системообразующим видом экономической деятельности в пространстве страны и ее регионов, определяет уровень инновационной активности. Именно от него напрямую зависят производственный потенциал, уровень экономики и уровень социальной устойчивости страны [1]. Прогресс любой страны невозможен без выверенной стратегии своего развития, в частности, без эффективной промышленной политики; так и ключевые отрасли не могут достичь хороших результатов без отраслевых стратегических планов развития [2,3,4].

Искусственный интеллект и машинное обучение стали одним из ключевых технологий XXI века. Основная цель искусственного интеллекта – создание машин и систем, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта. Машинное обучение (МО) – это область искусственного интеллекта, которая занимается разработкой алгоритмов, способных обучаться на данных и делать предсказания или принимать решения без явного программирования для выполнения конкретной задачи [5, 6,7,8,9].

Стандартизация, метрология, технические измерения и сертификация продукции, работ и услуг являются инструментами обеспечения качества, причем одним из немногих инструментов, которым возможно влиять на чужую экономику как на уровне отдельных предприятий – посредством задания и оформления более высоких показателей качества товаров и услуг, так и на уровне государств [10].

Неуклонное расширение международных связей не позволяет стандартизации замыкаться в рамках отдельного государства. Для успешного осуществления торгового, экономического и научно-технического сотрудничества различных стран первостепенное значение имеет международная стандартизация [11].

Стандартизация становится одним из важнейших средств улучшения организации общественного производства, осуществления экономической и технической политики государства, эффективного управления факторами интенсификации экономики, органически объединяя фундаментальные и прикладные науки, она способствует их целенаправленности и быстрейшему внедрению научных достижений в практическую деятельность [12,13].

Современные маркетологи стали добавлять слово «умный» практически к любому неживому объекту, если в нём есть хотя бы один индикаторный светодиод, а под интернетом вещей, как правило, подразумевается поддержка Wi-Fi. Между тем умные устройства и интернет вещей – это вполне конкретные современные технологии, возможности которых гораздо шире, чем простое мигание индикатора при включении питания и беспроводное подключение к интернету.

Радиочастотная метка /RFID – радиочастотная идентификация/ это пассивное устройство с антенной и микрочипом. Когда метка приближается к считывателю, устройство включается и появляется возможность считать информацию в памяти чипа.

Вместо того чтобы оснащать RFID-метками все предметы окружающего нас мира, возникла идея встроить миниатюрные компьютеры, которые свяжут эти предметы в единую сеть, что позволит управлять ими удаленно. В центре типичной схемы – встроенный программно-аппаратный комплекс на базе микросхемы – универсального контроллера. Микрочип располагает:

- процессором;
- памятью;
- интерфейсами ввода-вывода;

- аналого-цифровым преобразователем;

- цифро-аналоговым преобразователем.

Применение системы менеджмента качества является стратегическим решением для организации, которое может помочь улучшить результаты ее деятельности и обеспечить прочную основу для инициатив, ориентированных на устойчивое развитие.

Интеграция информационных и производственных технологий формирует новый уровень производства, которое становиться цифровым производством.

Следовательно, современного производства составляют цифровые технологии, которое стало возможным благодаря современным достижениям робототехники, многокоординатного станочного оборудования с числовым программным управлением, пакетов трехмерной графики. В качестве прикладного инструменте для разработки цифровых двойников используются компьютерные системы автоматизированного проектирования (САПР), такие как CAD (автоматизация проектирования в трехмерных и двухмерных пространствах).

Дальнейшая глобализация экономики, унификация подходов к построению взаимоотношений между контрагентами и сторонами различных коммерческих и некоммерческих связей, вызванная развитием информационных технологий приводит к появлению новых механизмов и экосистем, позволяющих способствовать применению искусственного интеллекта на производстве [14-15].

Положение об отделе системы менеджмента качества Учреждения «Костанайский социально-технический университет имени академика Зулхарнай Алдамжар» утверждено решением Ученого совета университета 29 августа 2025 года, протокол №1.

Настоящее положение об отделе системы менеджмента качества Учреждения «Костанайского социально-технического университета имени академика Зулхарнай Алдамжар» определяет его основные функции, задачи, порядок организации деятельности.

Основными целями отдела являются:

- ориентация деятельности университета на удовлетворение требований потребителя;

- обеспечение качества образовательных услуг в соответствии с международным стандартом ИСО 9001:2015;

- реализация Политики и Целей университета в области качества;

Основными задачами отдела являются:

- совершенствование и развитие системы менеджмента качества в масштабах университета.

- обеспечение соответствия требованиям СМК всех направлений деятельности ВУЗа.

Основные функции отдела:

- мониторинг, измерение и анализ процессов образовательной деятельности;

- организация, координация, и оценка деятельности структурных подразделений на соответствие критериям СМК.

- обеспечение своевременной и точной реализации внутренних нормативных документов СМК;

- разработка и принятие мер, необходимых для достижения запланированных результатов и постоянного улучшения образовательного процесса.

Стремительное развитие искусственного интеллекта уже влияет на мировоззрение и поведение людей, особенно молодежи. В качестве первого шага следует ускорить принятие Цифрового кодекса в Казахстане.

Для наглядна демонстрация возможностей искусственного интеллекта на производстве, создание образовательных материалов, проведение мастер-классов и открытых лекций, был проведен обучающий семинар: «Использование искусственного интеллекта в стандартизации и сертификации в области машиностроения».

Целевые индикаторы:

Искусственный интеллект – это область компьютерной науки, нацеленные на создание программ, способных выполнять задачи, которые обычно требуют человеческого интеллекта, такие как решение проблем, обучение, планирование, распознавание, восприятие.

Наглядна демонстрация возможностей искусственного интеллекта на производстве, создание образовательных материалов, проведение мастер-классов и открытых лекций.

Искусственный интеллект и машинное обучение стали одним из ключевых технологий XXI века. Основная цель искусственного интеллекта – создание машин и систем, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта

Машинное обучение (МО) – это область искусственного интеллекта, которая занимается разработкой алгоритмов, способных обучаться на данных и делать предсказания или принимать решения без явного программирования для выполнения конкретной задачи.

Машинное обучение (МО) стало неотъемлемой частью современной науки и техники, внедряясь в различные сферы нашей жизни. Его применение варьируется от простых задач, таких как классификация изображений, до сложных систем, способных прогнозировать поведение пользователей.

При обсуждении методологии исследуемой темы выступили представители производственных предприятий и организации Костанайской области.

В частности Ахатова Л.П. – начальник отдела стандартизации и сертификации автомобильного завода ТОО «СарыаркаАвтоПром». Экологическая оценка эффективности производственного процесса в рамках производственного экологического контроля осуществляется на основе измере-

ний и (или) расчетов уровня эмиссий в окружающую среду, вредных производственных факторов, а также фактического объема потребления природных, энергетических и иных ресурсов.

Программа экологического производственного контроля включает в себя:

- план-график внутренних проверок;
- программу производственного экологического мониторинга.

Производственный экологический контроль проводится на основе программы производственного экологического контроля, являющейся частью экологического разрешения, а также программы повышении экологической эффективности.

Производственный мониторинг является элементом производственного контроля, выполняемым для получения объективных данных с установленной периодичностью.

Производственный экологический мониторинг воздействия включает в себя мониторинг состояния воздушного бассейна, водных ресурсов, охрану земельных ресурсов и отходов производства.

Жанбатырова С.К.-специалист по системе менеджмента качества ТОО «KamlitKZ» выступила по теме: «Формирование систем менеджмента качества на заводе: опыт, задачи и перспективы».

Худяков Р. В**.** – ст. преподаватель Национального центра повышения квалификации «Өрлеу», представил возможности применения Искусственного интеллекта в образовательных программах; «Искусственный интеллект – Ваш цифровой навык, как его прокачать?»

Область применения Системы менеджмента качества распространяется на:

- услуги по организации государственной научно- технической экспертизы научных, научно- технических проектов и программ;
- организации работ национальных научных советов;
- систем автоматизации и оценке результатов научно – технической деятельности;

обеспечению доступа к научно – технической информации.

Костанайская область входит в число лидеров среди регионов, куда активно привлекаются инвестиции. Здесь успешно работает индустриальная зона, где созданы условия для ведения бизнеса, позволяющий инвесторам развивать свои проекты в комфортных условия. Глава государства Касым-Жомарт Токаев в ходе телемоста 21 октября 2025 г открыл автомобильный KIA Qazaqstan. На территории индустриальной зоны был выделен земельный участок площадью 70 га. Проведена работа по обеспечению завода полным комплексом инженерно-коммуникационной инфраструктуры, включая 4,2 км автомобильных дорог, парковки, 5,25 км железнодорожных подъездных путей и 44,5 км инженерных сетей», – озвучил глава региона. Он подчеркнул, что данный завод – это высокотехнологичное производство миро-

вого уровня с использованием самых современных технологий автомобилестроения. В частности, с максимальной автоматизацией и цифровым управлением производственных процессов.

Перспективные отрасли Костанайской области, где применяется искусственный интеллект:

в теплоснабжении, это:

- определение остаточного ресурса тепловых сетей;
- формирование рекомендаций по ремонту или замене труб;
- ожидаемая экономия средств до 25–30%.

в сельском хозяйство, это:

- заблаговременное определение заболеваний и обнаружение вредителей;
- повышение качества урожая и минимизация потерь;
- автоматический уход за растениями.

Интенсификация вычислительной мощности одновременно с уменьшением энергопотребления, размеров и стоимости микрочипов уже привели к тому, что интернет вещей начали применять в неожиданных областях, например в сельском хозяйстве. Умные датчики с автономным питанием, подключенные к общей беспроводной сети, самостоятельно собирают информацию о температуре и влажности воздуха и почвы, меряют количество выпавших осадков и самостоятельно передают эту информацию в центры обработки и хранения данных [5].

Цифровая среда и цифровое пространство не сводится к одному лишь Интернету как информационно-коммуникационной глобальной сети, цифровая среда охватывает все взаимодействия, технически обеспечиваемые и регулируемые с помощью цифровых технологий кодирования, криптозащиты, программирования и передачи информации, включая применение искусственного интеллекта.

При этом, использование искусственного интеллекта позволяет развивать свой инструментарий и даже существенным образом видоизменяется сообразно новым технологическим векторам, в частности, следует отметить следующие явления:

- широкое развитие получают так называемые облачные технологии, платформенные технологии;
- возникают новые бизнес-площадки и информационно-коммуникационные технологии;
- онлайн-платформы для ведения электронного бизнеса и построения коммерческих связей, развитие производственных технологий и удовлетворения экономических потребностей;
- в условиях развития цифровых трансграничных и смарт-контрактов возникает электронная торговля /E-commerce/, а вслед за ней и такое явление, как мобильная торговля /T-commerce/, где в киберпространстве Интернета контрагенты совершают коммерческие транзакции.

Рассмотрим основные этапы проектирования систем машинного обучения и реальные примеры их использования.

Применение машинного обучения:

Финансовый сектор

МО используется для прогнозирования рыночных трендов, оценки кредитоспособности клиентов, выявления мошенничества и автоматизации торговых стратегий.

Примеры:

- Оценка кредитоспособности: Модели МО анализируют финансовую историю клиентов и предсказывают вероятность дефолта.

- Выявление мошенничества: Алгоритмы выявляют аномальные транзакции и потенциальные случаи мошенничества.

Здравоохранение

МО помогает в диагностике заболеваний, прогнозировании эпидемий, персонализированной медицине и анализе медицинских изображений.

Примеры:

- Диагностика заболеваний: Алгоритмы анализируют медицинские данные и помогают врачам ставить точные диагнозы.

- Персонализированная медицина: Модели МО предлагают индивидуальные планы лечения на основе данных пациента.

Розничная торговля

МО используется для анализа покупательских привычек, прогнозирования спроса, оптимизации цепочек поставок и персонализации маркетинга.

Примеры:

- Прогнозирование спроса: Алгоритмы предсказывают будущий спрос на товары, что помогает в управлении запасами.

- Персонализация маркетинга: Модели МО анализируют поведение клиентов и предлагают персонализированные предложения и скидки.

Транспорт и логистика

МО помогает в оптимизации маршрутов, прогнозировании трафика, управлении автопарком и автоматизации транспортных средств.

Примеры:

- Оптимизация маршрутов: Алгоритмы помогают найти наиболее эффективные маршруты для доставки товаров.

- Автоматизация транспортных средств: Модели МО используются в системах автономного вождения.

Развлекательная индустрия

МО используется для рекомендаций контента, анализа предпочтений пользователей и создания новых форм медиа.

Примеры:

- Рекомендательные системы: Алгоритмы анализируют предпочтения пользователей и предлагают им релевантный контент (фильмы, музыку).

- Анализ предпочтений: Модели МО анализируют данные о поведении пользователей и помогают создавать популярный контент.

Существует множество онлайн-сервисов, которые активно используют машинное обучение для улучшения своих услуг.

Вот несколько примеров:

Google Search – использует алгоритмы машинного обучения для ранжирования результатов поиска, автоматического исправления ошибок в запросах, предсказания запросов и персонализации результатов на основе предыдущих поисков пользователя.

Amazon – применяет машинное обучение для рекомендаций товаров,

прогнозирования спроса, оптимизации цепочек поставок, автоматизации процессов на складах и персонализации рекламы.

Facebook – использует машинное обучение для распознавания лиц на фотографиях, персонализации новостной ленты, рекомендаций друзей, фильтрации спама и борьбы с фейковыми новостями.

YouTube – применяет модели машинного обучения для рекомендаций видео, автоматической генерации субтитров, модерации контента, анализа пользовательских предпочтений и оптимизации рекламы.

Gmail – использует машинное обучение для фильтрации спама, автодополнения текста в письмах (Smart Compose), автоматической сортировки писем по категориям (входящие, социальные, промоакции) и предотвращения фишинговых атак.

Uber – применяет машинное обучение для предсказания времени прибытия автомобилей, оптимизации маршрутов, динамического ценообразования, анализа пользовательских данных и прогнозирования спроса.

Эти онлайн-сервисы используют машинное обучение для повышения качества обслуживания, улучшения пользовательского опыта и оптимизации внутренних процессов.

Вывод:

Машинное обучение представляет огромный потенциал для улучшения эффективности и автоматизации множества процессов в различных отраслях. Однако успех применения машинного обучения во многом зависит от правильного проектирования и разработки моделей, а также от тщательного анализа и интерпретации данных.

Важно помнить, что внедрение МО требует не только технических знаний, но и понимания бизнес-процессов, этических и социальных аспектов, которые помогут обеспечить успешное и ответственное использование технологий машинного обучения в реальном мире.

Список литературы

1. Джаманбалин К.К., Джаманбалин Б.К. /Энергетика Казахстана: проблемы, пути решения и перспективы./ Учебное пособие, КСТУ им. Академика З. Алдамжар, 2025, – 56 с.

2. Джаманбалин, Б.К. Методологический подход к выбору главных проблем развития отрасли /Б.К. Джаманбалин, Ю.Б. Клюев // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2016. – № 5 (67) С. 123–131

3. Кокшаров, В.А., Джаманбалин, Б.К. Теоретические аспекты концепции оценки приоритетных проблем развития электроэнергетики страны (на примере Республики Казахстан) / В.А. Кокшаров, Б.К. Джаманбалин, О.В. Комиссарова // Вестник УрФУ. – Сер. : Экономика и управление. – 2019. – Т. 18. – С. 783–801.

4. Джаманбалин, Б.К. Теоретический анализ существующих методических подходов для выполнения приоритетных проблем развития электроэнергетики страны / Б.К. Джаманбалин, В.А. Кокшаров // Сб. статей IV Международной научно-практической конференции (Москва, 19.04.2019). – С. 112–116.

5. Поладов Ш. Искусственный интеллект и машинное обучение; технологии будущего./Международный научный журнал «Символ науки», 10-1-1/2024, с.72–73.

6. Хакдодов А.М. Интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в научных исследованиях./ XII международная конференция «Современные тенденции и инновации в науке и производстве», 26 апреля 2023г., с.463–1 – 463–5

7. Рудской А.И. Цифровые производственные системы: технологии, моделирование, оптимизация: монография.- СПб.: ПОЛИТЕХ ПРЕСС, 2020, – 828с.

8. Соколов Ю.А., Равилов Р.Г. Получение композиционных изделий на базе методов электронно-лучевого плавления и напыления./ Металлообработка. Электрофизические и Электрохимические методы обработки. 2016, № 1, с.12–17.

9. Соколов Ю.А. Получение композиционных изделий на базе гибридных технологий./ Металлообработка. Электрофизические и Электрохимические методы обработки. 2015, № 6(90), с.29–38.

10. Земляной К.Г..Метрология, стандартизация и сертификация : учебное пособие / М-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2022 – 235 с.

11. Закон Республики Казахстан «О стандартизации» от 5 октября 2018 г. № 183-VI ЗРК.

12. Хрисониди В.А. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие. Филиал МГТУ в пос. Яблоновском, 2016. – 197 с.

13. Лагутенков А. Тихая экспансия интернета вещей./ж. Наука и жизнь, 2018, № 5, с. 38–42.

14. «Гигант родился». / газета «Костанайские новости», 2025, № 41(23878), 23 октября, с. 2.

15. Джаманбалин Б.К., Джаманбалин К.К. Нанотехнологии и альтернативные источники энергии для промышленного производства Костанайской области Казахстана./ Вестник науки КСТУ имени академика Зулхарнай Алдамжар, 2025г, №1, с.8–14

Замураев Р.Д.
студент
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
Romanzamuraev322@gmail.com
Фахрудтинова А.А.
ассистент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий
Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ)
Россия, Нижнекамск
arinapyfik@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ, ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (ВЭУ), ГЭС В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РОССИИ

Аннотация. В работе исследуется технико-экономическая и экологическая эффективность применения основных возобновляемых источников энергии в климатических и географических условиях средней полосы России. Рассмотрены современные технологические решения, удельные показатели выработки электроэнергии (КИУМ), капитальные и операционные затраты, а также степень воздействия на окружающую среду. На основе анализа региональных метео- и гидрологических данных определена целесообразность внедрения распределённой генерации. Результаты исследования подтверждают техническую реализуемость и экономическую обоснованность гибридных энергосистем, сочетающих солнечную, ветровую и малую гидрогенерацию. В работе сформулированы рекомендации по оптимальному сочетанию технологий, обозначены перспективы развития ВИЭ в регионах с умеренным климатом.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), альтернативная энергетика, гибридные энергосистемы, энергоэффективность.

Zamuraev R.D.
Student
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
alsumahanova7@gmail.com
Fakhrudtinova A.A.
Assistant of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch of KNRTU)
Russia, Nizhnekamsk
arinapyfik@yandex.ru

STUDY ON THE EFFICIENCY OF UTILIZING SOLAR PANELS, WIND TURBINES, AND HYDROPOWER PLANTS IN CENTRAL RUSSIA

Abstract. This paper investigates the technical, economic, and environmental performance of major renewable energy sources under the climatic and geographical conditions of Central Russia. Modern technological solutions, specific electricity generation indicators (capacity factor), capital and operational expenditures, and environmental impact are analyzed. Based on regional meteorological and hydrological data, the feasibility of implementing distributed

generation is assessed. The results confirm the technical feasibility and economic viability of hybrid energy systems that integrate solar, wind, and small-scale hydropower generation. The study provides recommendations for an optimal technology mix and outlines prospects for renewable energy development in temperate climate regions.

Keywords: Renewable energy sources (RES), alternative energy, hybrid energy systems, energy efficiency.

Глобальный переход к низкоуглеродной энергетике, рост тарифов традиционное топливо и необходимость повышения энергетической на устойчивости регионов делают возобновляемые источники энергии (ВИЭ) очень важными Средняя полоса России, включающая Центральную Россию, Поволжье и части Северо-Запада, исторически опирается на централизованные тепловые электростанции и магистральные сети. Однако климатические особенности региона создают условия для комплексного внедрения ВИЭ. Актуальность работы обусловлена потребностью в объективной оценке технико-экономической эффективности солнечных, ветровых и гидроэлектрических установок именно для условий средней полосы, где потенциал ВИЭ часто недооценивается из-за стереотипов о «недостаточном солнце» или слабом «ветре».

Цель исследования

Оценить техническую, экономическую и экологическую. Эффективность использования солнечных панелей, ветроэнергетических установок (ВЭУ) и гидроэлектростанций (ГЭС) в условиях средней полосы России и разработать рекомендации по их оптимальному комбинированию для обеспечения устойчивого энергоснабжения региона.

Задачи исследования

1. Изучить технологические принципы и современные модификации солнечных панелей ветроустановок и ГЭС.

2. Проанализировать данные по выработке электроэнергии каждым из источников с учетом климатических и географических особенностей средней полосы.

3. Выявить преимущества и ограничения каждого вида ВИЭ.

4. Провести сравнительный анализ по показателям эффективности, стоимости жизненного цикла и экологическому воздействию.

5. Исследовать потенциал внедрения ВИЭ в городах и районах региона, где возобновляемая энергетика практически не представлена.

6. Сформулировать рекомендации по оптимальному сочетанию источников и направлениям дальнейших исследований.

Анализ эффективности использования солнечных панелей, ветрогенераторов и ГЭС в условиях средней полосы России

Солнечные панели. Технологии и принципы действия

Солнечная энергетика базируется на фотоэлектрическом эффекте: поглощение фотонов полупроводниковым материалом генерирует постоянный ток, который инвертором преобразуется в переменный. В настоящее

время доминируют монокриталлические модули (КПД 20–24%), поликристаллические (15–18%) и тонкоплёночные технологии. Перспективными направлениями стали бифациальные панели, модули с гетероструктурой и системы трекинга, повышающие выработку на 10–25%. Для автономной работы применяются литий-ионные и проточные аккумуляторы, а также системы управления энергией.

Данные по производительности в условиях средней полосы России.

Средняя годовая суммарная солнечная радиация в регионе составляет 1000–1300 кВт·ч/м². Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) солнечных электростанций (СЭС) варьируется в пределах 10–15%. Летняя выработка может в 3–4 раза превышать зимнюю из-за угла падения лучей, облачности и снежного покрова. Тем не менее, современные панели эффективно работают при рассеянном излучении, а бифациальные модули дополнительно улавливают отражённый от снега свет, компенсируя сезонный спад до 15–20%. Годовая выработка 1 кВт установленной мощности СЭС в средней полосе составляет 850–1100 кВт·ч.

Преимущества: модульность и масштабируемость, низкие эксплуатационные затраты, отсутствие движущихся частей, возможность установки на крышках и фасадах, быстрое развёртывание, снижение потерь в сетях при распределённой генерации.

Недостатки: выраженная суточная и сезонная неравномерность выработки, зависимость от погодных условий, необходимость накопителей энергии для автономной работы, снижение КПД при высоких температурах, утилизация модулей по окончании срока службы (25–30 лет).

Ветрогенераторы

Технологии и типы ветряков.

Современные ВЭУ представляют собой высокотехнологичные комплексы с горизонтальной или вертикальной осью вращения. В средней полосе наиболее распространены наземные комплексы с горизонтальной осью вращения с мощностью 2–5 Мвт с диаметром ротора 100–150м, прямым приводом или многоступенчатым редуктором, системами автоматического регулирования угла лопасти (pitch-контроль) и встроенными датчиками метеоусловий. Малые ветроустановки (до 100 кВт) применяются для децентрализованного энергоснабжения фермерских хозяйств и удалённых посёлков.

Данные по производительности и воздействию на окружающую среду.

Средняя скорость ветра на высоте 10 метров в регионе составляет 3.5–5 м/с, однако на современных высотах башни (80–110 метров) она достигает 5.5–7.5 м/с, что соответствует 3–4 классам ветропотенциала. КИУМ ВЭУ в средней полосе оценивается в 20–30%. Годовая выработка 1 МВт мощности – 1.8–2.6 кВт·ч.

Экологическое воздействие включает: низкий углеродный след, минимальное потребление воды, потенциальное влияние на миграцию птиц. При

соблюдении нормативов и использовании сельскохозяйственных земель под основаниями турбин негативное влияние сводится к минимуму.

Преимущества и недостатки.

Преимущества: высокий КИУМ по сравнению с СЭС, комплементарность выработки, возможность совместного использования земель, долгий срок службы.

Недостатки**:** зависимость от локального ветрового режима, необходимость модернизации сетей для интеграции, сложности с логической крупногабаритных компонентов, зависимость от импортных комплектующих в условиях санкций.

Гидроэлектростанции

Принцип работы ГЭС и их виды.

ГЭС преобразует потенциальную и кинетическую энергию водного потока в электрическую посредством сращения гидротурбин, соединённых в электрогенераторы. По типу регулирования стока выделяют:

Плотинные (водохранилищные) – с накоплением воды, возможностью регулирования мощности.

Деривационные и русловые (безнапорные) – используют естественный уклон реки.

Гидроаккумулирующие – для сглаживания пиков нагрузки.

Малые и микроГЭС (до 10 МВт) – наиболее перспективны для региональной распределённой генерации.

Данные по эффективности и эксплуатации в средней полосе.

КПД современных гидротурбин достигает 85–92%, КИУМ 40–60% в зависимости от режима стока и типа станции. В средней полосе крупные ГЭС сосредоточены на Волжско-Камском каскаде, однако потенциал малых ГЭС на притоках Оки, Волхова, Шексны и других рек оценивается в 1.5–2 ГВт. Сезонные колебания (паводок весной, межень летом/зимой, ледостав) требуют автоматизации и адаптации конструкций. Современные малые ГЭС с рыбозащитными устройствами и донными водосбросами снижают экологические риски.

Преимущества: высокая эффективность и предсказуемость выработки, возможность работы в базовом и пиковом режимах, длительный срок эксплуатации, низкие операционные затраты.

Недостатки: высокая начальная стоимость, длительное строительство, влияние на экосистемы рек (миграция рыб, изменение гидрологического режима), ограниченная географическая привязка, необходимость согласований с Росрыболовством и Росприроднадзором.

Итоги анализа технологий в регионе.

Анализ трёх основных видов ВИЭ показывает, что в условиях средней полосы России каждый источник обладает выраженной технологической зрелостью, но ограниченной самостоятельностью из-за климатической сезонности. Солнечные панели отличаются максимальной гибкостью разме-

щения и минимальными сроками ввода в эксплуатацию, однако их выработка сильно зависит от времени года и облачности. Ветроустановки демонстрируют более стабильный годовой КИУМ и эффективно дополняют солнечную генерацию с осенне-зимний период и ночные часы. Малые ГЭС обладают наивысшим коэффициентом использования мощности и обеспечивают предсказуемую базовую нагрузку, но их реализация жёстко привязана к гидрологическим и экологическим ограничениям конкретных водотоков (табл. 1).

Таблица 1

Эффективности разных источников энергии

Показатель	Солнечные панели	Ветроустановки	Малые ГЭС
КИУМ в средней полосе	10–15%	20–30%	40–60%
Удельная выработка (кВт·ч/кВт·год)	950–1100	1300–1500	3500–5000
Уровень капитальных затрат	Низкий/Средний	Высокий	Очень высокий
Эксплуатационные затраты	Очень низкие	Средние	Низкие
Срок окупаемости (лет)	7–12	8–14	10–18

*кВт·ч/кВт·год – это удельная годовая выработка электроэнергии.

Все три технологии обеспечивают сокращение CO_2 на 80–95% по сравнению с угольными/газовыми ТЭЦ. СЭС и ВЭУ имеют меньший земельный отчуждаемый фонд при распределённом размещении, тогда как ГЭС требуют водный акваторий. Экологические риски СЭС связаны с производством и утилизацией панелей, ВЭУ – с воздействием на фауну и ландшафт, ГЭС – с изменением гидрологии. Экономически наиболее устойчивыми в текущих условиях являются гибридные решения, снижающие потребность в резервировании и накопителях. Уровень приведенной стоимости электроэнергии[3] в регионе оценивается: СЭС – 7.8–14.1 руб/кВт·ч, ВЭУ – 5–11.7 руб/кВт·ч, малые ГЭС – 1.5–20,6 руб/кВт·ч (зависит от площадки и масштаба).

Рекомендации по оптимальному сочетанию источников энергии в регионе.

1. Гибридные микросети: комбинация СЭС + ВЭУ + накопители (литий-ионные/проточные) обеспечивают покрытие 60–80% нагрузки муниципальных объектов.

2. Малые ГЭС как стабилизирующий элемент: внедрение на реках с устойчивым стоком для базовой нагрузки и частотного регулирования.

[3] LCOE (от англ. Levelized Cost of Energy) – это полная приведённая стоимость электроэнергии. Простыми словами: сколько в среднем стоит произвести 1 киловатт-час (кВт·ч) электроэнергии на конкретной электростанции за весь срок её службы (с учётом строительства, топлива, обслуживания, утилизации).

3. Умные сети и диспетчеризация: использование прогнозов погоды, AI-управления генерацией и спросом, виртуальных электростанций.

4. Нормативная поддержка: упрощение процедур технологического присоединения, субсидирование накопителей, стимулирование локализации производства оборудования.

Перспективы развития ветряных мельниц, солнечных панелей, ГЭС на территории России

В средней полосе России значительная часть средних и малых городов (например, ряд муниципальных образований Тверской, Ярославской, Костромской, Смоленской, Владимирской областей) до сих пор зависят от изношенных ТЭЦ, дизель-генераторов или удалённых сетей.

Причины отсутствия ВИЭ: историческая централизация энергосбережения, восприятие низкого природного потенциала, высокие стартовые затраты, административные барьеры. При этом многие из этих населённых пунктов обладают крышными ресурсами для СЭС, участками с ветропотенциалом >5 м/с на высоте 80 м+ и малыми реками с перепадом высот 1.5–3 метра.

Рассмотреть эффективность в данных городах источники возобновляемой энергии.

Моделирование энергобалансов показывает, что внедрение распределённых СЭС и малых ВЭУ способно покрыть 30–6-% потребностей ЖКХ, социальных объектов и малого бизнеса при снижении потерь в сетях на 15–25%. В городах с рельефом и малыми реками малые ГЭС мощностью 0,5–5МВт могут обеспечить стабильную базовую генерацию. Ключевыми факторами успеха станут:

Проведение локальных метео- и гидрологических измерений.

Создание региональных центров компетенций по ВИЭ.

Применение модульных и контейнерных решений для быстрого развёртывания.

Включение ВИЭ в программы модернизации коммунальной инфраструктуры и нацпроекты.

В пример перспектив развития ВИЭ можно рассмотреть г. Смоленск (Смоленская область) (табл. 2), г. Владимир (Владимирская область) (табл. 3).

Таблица 2

Сведения по г. Смоленску

Население	~310,5 тыс. чел.
Текущая генерация	Смоленская АЭС (3 ГВт), ТЭЦ
Наличие ВИЭ	Единичные частные СЭС

Потенциал ВИЭ:

Солнечная энергия: летняя выработка 5,6–6 кВт·ч/день на 1 кВт мощности. Установка 4 МВт распределённых СЭС: выработка ~3,8–4,6 млн кВт·ч/год.

Ветровая энергия: скорость ветра 4,8–5,6 м/с. Установка 3 ВЭУ по 2 МВт: выработка ~11–14 млн кВт·ч/год.

Малые ГЭС: реки Днепр, Сож, Вязьма с перепадами 1–2,5 м. Потенциал сикроГЭС 0,3–0,7 МВт: выработка ~2–4 млн кВт·ч/год.

Г. Владимир.

Таблица 3

Сведения по г. Владимиру

Население	~350 тыс. чел.
Текущая генерация	Владимирская ТЭЦ
Наличие ВИЭ	Отсутствуют

Потенциал ВИЭ:

Солнечная энергия: установки 6 МВт СЭС на промышленных зданиях и парковках: выработка ~5,5–6,8 млн кВт·ч/год.

Ветровая энергия: скорость ветра 5–5.9 м/с. Установка 2 ВЭУ по 3 МВт: выработка ~12–16 млн кВт·ч/год.

Малые ГЭС: река Клязьма с участками перепада 1,5–3 м. Потенциал микроГЭС 0,4–0,9 МВт: выработка ~3-5 млн кВт·ч/год.

Основные выводы исследования

1. Солнечные панели, ветроустановки и ГЭС технически жизнеспособны в условиях средней полосы России при использовании современных технологий учёте региональной специфики.

2. Наивысший КИУМ демонстрируют ГЭС и ВЭУ, однако СЭС выигрывают в гибкости размещения и скорости развёртывания.

3. экономическая эффективность повышается при гибридном сочетании источников, использовании накопителей энергии и цифровизации управления сетями.

4. Экологическое воздействие всех трёх технологий минимально по сравнению с традиционной генерацией при соблюдении нормативов и применении современных инженерных решений.

Перспективы развития возобновляемых источников энергии в средней полосе России.

Средняя полоса обладает недооценённым потенциалом для распределённой и гибридной ВИЭ-генерации. В ближайшие 5–10 лет ожидания рост числа микросетей на базе СЭС + ВЭУ, модернизации малых ГЭС, внедрение систем хранения энергии и развитие локальных производств компонентов. Интеграции ВИЭ в региональные энергобалансы будет способствовать снижению зависимости от импорта топлива, повышению устойчивости к климатическим и геополитическим рискам, созданию новых рабочих мест и выполнению долгосрочных экологических обязательств.

Рекомендации для исследований и практической реализации.

1. Научные исследования: долгосрочный мониторинг гибридных установок в реальных условиях, разработка адаптивных алгоритмов прогнозирования выработки, тестирование альтернативных накопителей (проточные батареи, тепловые аккумуляторы).

2. Практическая реализация: создание региональных «зелёных» энергетических кластеров, упрощение процедур согласования для объектов до 15 МВт, подготовка кадров через программы дополнительно образования в технических вузах.

3. Политическое и финансовое обеспечение: расширение программ поддержки ВИЭ, стимулы для локализации производства инверторов, лопастей, гидротурбин и систем управления.

Дальнейшее развитие возобновляемой энергетики в средней полосе России требует системного подхода, сочетающего технологическую адаптацию, экономическую обоснованность и экологическую ответственность. При грамотной реализации регион может стать моделью устойчивого энергетического перехода для умеренных широт.

Список литературы

1. Возобновляемая энергетика России. Текст: электронный // Википедия: свободная энциклопедия: [сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Возобновляемая_энергетика_России (дата обращения: 24.04.2026).
2. Вазим А. А. Развитие ВИЭ-генерации в России: проблемы и перспективы / А. А. Вазим. Текст: электронный // КиберЛенинка: научная электронная библиотека: [сайт].- 2024. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-vie-generatsii-v-rossii-problemy-i-perspektivy (дата обращения: 24.04.2026).
3. Канарейкин А. И. Об эффективности использования солнечной энергии в марте месяце в средней полосе РФ / А. И. Канарейкин. Текст: электронный // КиберЛенинка: научная электронная библиотека: [сайт].- 2021.- № 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ob-effektivnosti-ispolzovaniya-solnechnoy-energii-v-marte-mesyatse-v-sredney-polose-rf (дата обращения: 24.04.2026).
4. Карта ветровых районов России. Текст: электронный // ToEnergo: портал энергетического оборудования: [сайт]. URL: https://toenergo.ru/karta-vetrovykh-rayonov/ (дата обращения: 25.04.2026).
5. Аналитика. Текст: электронный // Ассоциация «Гидроэнергетика России»: официальный сайт: [сайт]. URL: https://www.hydropower.ru/hydropower/analitics/ (дата обращения: 25.04.2026).
6. Альтернативная энергетика для средней полосы России. Текст: электронный // RG62: региональный информационный портал: [сайт].- 2025. URL: https://rg62.info/2025/11/27/alternativnaya-energetika-dlya-srednej-polosy-rossii/ (дата обращения: 26.04.2026).
7. Как развиваются возобновляемые источники энергии в России. Текст: электронный // ANGI: Агентство нефтегазовой информации: [сайт]. URL: https://www.angi.ru/news/2925976/ (дата обращения: 27.04.2026).
8. Возобновляемая энергия: источники, виды, развитие ВИЭ в России. Текст: электронный // Российская газета: федеральное издание: [сайт]. URL: https://rg.ru/2023/11/22/vozobnovliaemye-istochniki-energii-dejstvitelno-li-oni-ekonomichny-i-ekologichny.html/ (дата обращения: 27.04.2026).

Косых А.М.
аспирант
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
Россия, Санкт-Петербург
kosykhsenya@mail.ru

МЕТОД И СИСТЕМА УДАЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕЧЕНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ЭПИЛЕПТИЧЕСКИМ СИНДРОМОМ НА ОСНОВЕ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЭЭГ

Аннотация. Статья посвящена разработке метода и системы удалённой оценки эффективности лечения пациентов с эпилептическим синдромом на основе многопараметрического мониторинга и интеллектуального анализа электроэнцефалографических сигналов. Рассматривается возможность перехода от эпизодической стационарной диагностики к длительному дистанционному наблюдению за пациентом в домашних условиях. Предлагаемый подход основан на регистрации ЭЭГ, параметров двигательной активности, сердечного ритма, сна, данных цифрового дневника приступов и сведений о медикаментозной терапии. Для обработки информации предусматривается применение алгоритмов фильтрации, выделения диагностических признаков, машинного обучения и автоматического выявления эпилептиформной активности. Особое внимание уделено формированию интегрального показателя эффективности лечения, позволяющего врачу оценивать динамику состояния пациента и своевременно корректировать терапию.

Ключевые слова: эпилептический синдром, электроэнцефалография, ЭЭГ, дистанционный мониторинг, многопараметрический мониторинг, интеллектуальный анализ данных, машинное обучение, телемедицина, эффективность лечения.

Kosykh A.M.
Postgraduate Student
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»
Russia, Saint Petersburg
kosykhsenya@mail.ru

METHOD AND SYSTEM FOR REMOTE ASSESSMENT OF TREATMENT EFFECTIVENESS IN PATIENTS WITH EPILEPTIC SYNDROME BASED ON MULTIPARAMETER MONITORING AND INTELLIGENT EEG ANALYSIS

Abstract. The article is devoted to the development of a method and system for remote assessment of treatment effectiveness in patients with epileptic syndrome based on multiparameter monitoring and intelligent analysis of electroencephalographic signals. The possibility of transition from episodic in-hospital diagnostics to long-term remote monitoring of patients at home is considered. The proposed approach is based on EEG recording, motor activity parameters, heart rate, sleep characteristics, digital seizure diary data, and information on drug therapy. Signal filtering, diagnostic feature extraction, machine learning methods, and automatic detection of epileptiform activity are proposed for data processing. Particular attention is paid to the formation of an integral treatment effectiveness indicator, which allows the physician to assess patient dynamics and adjust therapy in a timely manner.

Keywords: epileptic syndrome, electroencephalography, EEG, remote monitoring, multiparameter monitoring, intelligent data analysis, machine learning, telemedicine, treatment effectiveness.

Эпилептический синдром является одним из наиболее значимых неврологических состояний, требующих длительного наблюдения, регулярной оценки эффективности терапии и своевременной коррекции лечебного процесса. Основным инструментальным методом диагностики эпилептической активности остаётся электроэнцефалография, позволяющая регистрировать биоэлектрическую активность головного мозга и выявлять характерные патологические паттерны.

Однако традиционная стационарная ЭЭГ имеет ряд ограничений. К ним относятся кратковременность записи, зависимость результата от момента обследования, необходимость нахождения пациента в медицинском учреждении, а также невозможность непрерывного контроля состояния в естественных условиях жизни. При редких приступах или изменчивом течении заболевания стандартное обследование не всегда позволяет получить достаточный объём данных для объективной оценки эффективности лечения.

В связи с этим актуальным направлением является разработка удалённых систем наблюдения, объединяющих носимые устройства, мобильные ЭЭГ-комплексы, телемедицинские технологии и алгоритмы интеллектуального анализа данных. Такой подход позволяет перейти от разовой диагностики к непрерывному мониторингу состояния пациента, что особенно важно при подборе противоэпилептической терапии и оценке её результативности [2], [3].

Научная новизна работы заключается в разработке комплексного метода удалённой оценки эффективности лечения пациентов с эпилептическим синдромом, отличающегося совместным использованием данных ЭЭГ, параметров двигательной активности, сердечного ритма, сна, цифрового дневника приступов и сведений о медикаментозной терапии. В отличие от традиционного подхода, основанного преимущественно на эпизодическом клиническом наблюдении, предлагаемый метод позволяет формировать интегральный показатель эффективности лечения и отслеживать динамику состояния пациента в условиях домашнего мониторинга [1], [3].

Целью работы является разработка метода и системы удалённой оценки эффективности лечения пациентов с эпилептическим синдромом на основе многопараметрического мониторинга и интеллектуального анализа ЭЭГ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить состав регистрируемых физиологических и клинических параметров, разработать структуру системы удалённого мониторинга, определить этапы предварительной обработки ЭЭГ-сигнала, сформировать

набор диагностических признаков, предложить принцип расчёта интегрального показателя эффективности лечения, определить направления применения интеллектуального анализа ЭЭГ.

Метод удалённой оценки эффективности лечения

Предлагаемый метод основан на комплексной регистрации физиологических и клинических параметров пациента с последующим автоматизированным анализом полученных данных. В отличие от классической схемы, при которой врач оценивает состояние пациента преимущественно по результатам периодических обследований и субъективным жалобам, дистанционный подход позволяет формировать объективную динамическую картину течения заболевания.

Основу метода составляют следующие этапы:

- регистрация ЭЭГ-сигнала с использованием носимого или портативного устройства;
- сбор дополнительных физиологических параметров;
- передача данных на локальный или облачный сервер;
- предварительная обработка сигналов;
- выделение информативных признаков;
- интеллектуальный анализ и классификация состояний;
- расчёт показателя эффективности лечения;
- формирование отчёта для врача.

На первом этапе выполняется регистрация биоэлектрической активности головного мозга. Для повышения диагностической ценности мониторинга данные ЭЭГ дополняются сведениями о частоте сердечных сокращений, двигательной активности, качестве сна, времени приёма лекарственных препаратов и субъективными отметками пациента о приступах или предвестниках приступов.

Таблица 1

Параметры мониторинга

Группа параметров	Регистрируемые данные	Диагностическое значение
ЭЭГ	спайки, острые волны, ритмы, комплексы «пик-волна»	выявление эпилептиформной активности
Сердечный ритм	ЧСС, вариабельность сердечного ритма	оценка вегетативных изменений
Двигательная активность	акселерометрия, тремор, резкие движения	фиксация моторных проявлений приступов
Сон	длительность, фазы, ночные пробуждения	выявление связи приступов со сном
Дневник пациента	жалобы, предвестники, время приступа	клиническая интерпретация событий
Терапия	препарат, дозировка, регулярность приёма	оценка связи лечения и динамики состояния

На втором этапе производится предварительная обработка сигналов. Она включает фильтрацию сетевых помех, удаление артефактов движения,

подавление мышечной активности, нормализацию амплитудных характеристик и сегментацию записи на временные интервалы. Данный этап является необходимым, поскольку при домашнем мониторинге качество сигнала может снижаться из-за движения пациента, неправильного расположения электродов или внешних электромагнитных помех.

На третьем этапе из обработанного сигнала выделяются диагностически значимые признаки: спектральная мощность основных ритмов ЭЭГ, временно-частотные характеристики, параметры межканальной когерентности, признаки асимметрии, наличие спайков, острых волн и комплексов «пик-волна». Эти признаки используются для автоматического выявления эпилептиформной активности и оценки её изменения во времени.

Схема может быть такой, как показана на рисунке.

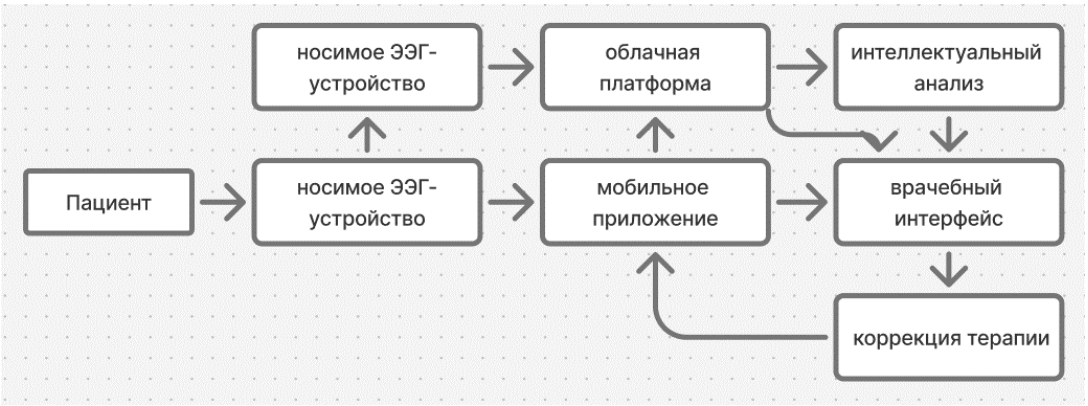


Рис. Структурная схема системы удалённой оценки эффективности лечения пациентов с эпилептическим синдромом

Структура системы удалённого мониторинга

Разрабатываемая система может быть представлена в виде трёхуровневой архитектуры.

Первый уровень – пациентский. Он включает носимое ЭЭГ-устройство, дополнительные биосенсоры, мобильное приложение и локальный модуль передачи данных. На этом уровне осуществляется регистрация сигналов и первичная синхронизация информации.

Второй уровень – аналитический. Он представляет собой серверную или облачную платформу, на которой выполняются хранение, обработка и интеллектуальный анализ данных. Здесь реализуются алгоритмы распознавания эпилептиформных паттернов, оценки частоты приступов, анализа динамики ЭЭГ и построения индивидуального профиля пациента.

Третий уровень – клинический. Он предназначен для врача и включает интерфейс визуализации данных, автоматические отчёты, предупреждения о возможном ухудшении состояния, а также рекомендации по дополнительной проверке или коррекции терапии.

Взаимодействие уровней обеспечивает непрерывный цикл наблюдения: пациент регистрирует данные в домашних условиях, система автоматически анализирует изменения, а врач получает структурированную информацию для принятия клинического решения [4].

Интеллектуальный анализ ЭЭГ является ключевым компонентом предлагаемой системы. Его задача заключается не только в обнаружении отдельных патологических событий, но и в оценке общей динамики состояния пациента на фоне лечения.

Для автоматической обработки ЭЭГ могут применяться следующие группы методов:

- методы спектрального анализа;
- вейвлет-преобразование;
- анализ временно-частотных карт;
- методы выделения нелинейных признаков;
- алгоритмы машинного обучения;
- нейросетевые модели классификации.

Наиболее перспективным является комбинированный подход, при котором классические методы цифровой обработки сигналов используются совместно с алгоритмами машинного обучения. Например, после выделения спектральных, амплитудных и временных признаков классификатор может определять состояние пациента как нормальное, интериктальное, преиктальное или иктальное.

Для анализа длительных записей целесообразно использовать модели, учитывающие временную зависимость данных. К таким моделям относятся рекуррентные нейронные сети, LSTM-архитектуры и гибридные алгоритмы, объединяющие свёрточные и временные блоки. Их применение позволяет выявлять скрытые закономерности, которые затруднительно обнаружить при визуальном анализе [5], [6].

Оценка эффективности лечения

Эффективность лечения пациентов с эпилептическим синдромом не может оцениваться только по факту наличия или отсутствия приступов. Важными являются также изменения частоты эпилептиформных разрядов, длительности патологических эпизодов, структуры сна, выраженности предвестников и реакции организма на терапию.

В рамках предлагаемого метода целесообразно использовать интегральный показатель эффективности лечения, учитывающий несколько групп параметров:

- динамику ЭЭГ-показателей;
- частоту и длительность приступов;
- выраженность интериктальной активности;
- данные о сне и двигательной активности;
- регулярность приёма лекарственных препаратов;
- субъективные отметки пациента;
- наличие побочных эффектов.

Обобщённо показатель эффективности можно представить следующим образом

$$K_{eff} = w_1 F_{EEG} + w_2 F_{seiz} + w3 F_{bio} + 4F_{therapy}$$

где F_{EEG} – показатель изменения ЭЭГ-активности,
F_{seiz} показатель частоты и выраженности приступов,
F_{bio} – совокупность дополнительных физиологических параметров,
$F_{therapy}$ – характеристика соблюдения и переносимости терапии,
w_1 , w_2 , w_3, w_4 – весовые коэффициенты.

Такой показатель может рассчитываться индивидуально для каждого пациента, поскольку течение эпилептического синдрома и ответ на терапию имеют выраженный персонализированный характер.

При положительной динамике значение интегрального показателя должно отражать снижение частоты приступов, уменьшение количества эпилептиформных разрядов, стабилизацию сна и повышение регулярности приёма препаратов. Условно могут быть выделены три уровня эффективности: высокая эффективность, частичная эффективность и отсутствие положительной динамики (табл. 2).

Таблица 2

Критерии эффективности лечения

Уровень эффективности	Критерии
Высокая	снижение приступов и эпилептиформной активности, стабильный сон, хорошая переносимость терапии
Частичная	снижение отдельных показателей при сохранении патологической активности
Низкая	отсутствие улучшения или ухудшение ЭЭГ/клинических параметров

Предлагаемый метод имеет ряд практических преимуществ (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение с традиционным подходом

Критерий	Традиционная ЭЭГ	Предлагаемая система
Длительность наблюдения	ограниченная	длительная
Условия регистрации	стационар	домашняя среда
Частота оценки	эпизодическая	регулярная/непрерывная
Учет терапии	ограниченный	интегрированный
Автоматический анализ	не всегда применяется	является частью системы
Персонализация	зависит от врача	поддерживается накоплением данных

Во-первых, он позволяет повысить объективность оценки лечения. Врач получает не только сведения со слов пациента, но и длительные записи физиологических параметров.

Во-вторых, дистанционный мониторинг позволяет выявлять изменения состояния между плановыми визитами. Это особенно важно при подборе дозировки препаратов или смене схемы лечения.

В-третьих, система способствует персонализации медицинской помощи. На основе накопленных данных можно формировать индивидуальный профиль пациента и оценивать, какие изменения действительно связаны с улучшением или ухудшением состояния.

В-четвёртых, использование интеллектуального анализа снижает нагрузку на врача при обработке длительных ЭЭГ-записей. Алгоритмы могут автоматически выделять подозрительные фрагменты, формировать отчёты и указывать периоды, требующие экспертной проверки.

Ограничения и проблемы внедрения

Несмотря на перспективность предлагаемого подхода, его практическая реализация связана с рядом ограничений.

К техническим ограничениям относятся возможные артефакты сигнала, нестабильность контакта электродов, ограниченное число каналов в мобильных ЭЭГ-системах и необходимость надёжной передачи данных. При домашнем использовании особенно важны простота интерфейса и возможность самостоятельного применения устройства пациентом.

К клиническим ограничениям относится необходимость валидации алгоритмов на репрезентативных выборках пациентов. Модели интеллектуального анализа должны демонстрировать не только высокую точность, но и устойчивость к индивидуальным особенностям ЭЭГ.

Также необходимо учитывать вопросы защиты персональных медицинских данных, так как система работает с чувствительной информацией. Передача и хранение данных должны выполняться с использованием современных методов шифрования, разграничения доступа и журналирования действий пользователей.

Предложенный подход отличается от большинства существующих решений тем, что рассматривает эффективность лечения не как единичный клинический показатель, а как совокупность взаимосвязанных параметров. Это позволяет учитывать не только частоту приступов, но и скрытую эпилептиформную активность, качество сна, двигательную активность и соблюдение режима терапии. Такой подход особенно важен при длительном наблюдении пациентов, у которых клиническое улучшение может не совпадать с изменениями ЭЭГ-картины.

Разработка метода и системы удалённой оценки эффективности лечения пациентов с эпилептическим синдромом является актуальной задачей современной биомедицинской инженерии и цифрового здравоохранения.

Предлагаемый подход объединяет многопараметрический мониторинг, мобильную электроэнцефалографию, телемедицинскую передачу данных и интеллектуальный анализ ЭЭГ.

Использование такой системы позволяет перейти от эпизодической диагностики к непрерывному наблюдению за состоянием пациента, повысить объективность оценки терапии и обеспечить своевременную коррекцию лечебного процесса. Интеграция алгоритмов машинного обучения создаёт условия для автоматического выявления эпилептиформной активности, прогнозирования ухудшений и построения персонализированных моделей лечения.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного метода при создании аппаратно-программного комплекса для домашнего мониторинга пациентов с эпилептическим синдромом. Система может использоваться для поддержки врачебных решений, контроля эффективности противоэпилептической терапии и раннего выявления ухудшения состояния пациента.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку прототипа аппаратно-программного комплекса, клиническую апробацию метода, оценку точности алгоритмов и создание удобного интерфейса для врача и пациента.

Список литературы

1. Bruno E., Biondi A., Thorpe S., Richardson M. P. Patients self-mastery of wearable devices for seizure detection: A direct user-experience // Seizure: European Journal of Epilepsy.
2. Shivaraja T. R., Remli R., Zaidi W. A. W., Chellappan K. Remote Epilepsy Monitoring: Signal Quality and Reliability Comparative Analysis // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 19845–19861. DOI: 10,1109/ACCESS.2025.3531130,
3. Biondi A., Santoro V., Viana P. F., Laiou P., Pal D. K., Bruno E., Richardson M. P. Noninvasive mobile EEG as a tool for seizure monitoring and management: A systematic review // Epilepsia. 2022. DOI: 10,1111/epi.17220,
4. Milne-Ives M., Duun-Henriksen J., Blaabjerg L., Mclean B., Shankar R., Meinert E. At home EEG monitoring technologies for people with epilepsy and intellectual disabilities: A scoping review // Seizure: European Journal of Epilepsy.
5. Trögemeyer Y., Surges R., Altenmüller D.-M. et al. Can commercially available wearable EEG devices be used for diagnostic purposes? An explorative pilot study // Epilepsy & Behavior. 2020, Vol. 103. Art. 106507. DOI: 10,1016/j.yebeh.2019.106507.
6. Carvalho D., Mendes T., Dias A. I., Leal A. Interictal spike quantification in continuous spike-wave of sleep: Clinical usefulness of a wearable EEG device // Epilepsy & Behavior. 2020, Vol. 104. Art. 106902.

Елизарова Н.Ю.
к.э.н., доцент кафедры «Динамика процессов и управления»
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
enu1604@mail.ru
Климковский Я.И.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
KlimkovskiyYI@stud.kai.ru

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКОЙ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Аннотация. В статье рассматривается проблема отсутствия формализованных методов оценки эффективности процессов подготовки научных публикаций в организациях. Показано, что использование разрозненных инструментов взаимодействия между участниками приводит к увеличению временных затрат, усложнению процессов согласования и снижению контроля за сроками выполнения работ. Проведён анализ существующих подходов к организации подготовки научных публикаций, выявивший необходимость применения централизованных информационных решений. В работе предложена автоматизированная система управления подготовкой научных публикаций, обеспечивающая централизованное хранение материалов, управление версиями документов, а также автоматизацию процесса согласования и контроля сроков выполнения задач. Дополнительно рассматриваются функциональные возможности системы, направленные на повышение прозрачности взаимодействия участников процесса и улучшение контроля за этапами подготовки публикаций. Разработан метод оценки эффективности системы, основанный на использовании количественных показателей, включающих время подготовки публикации, количество итераций согласования и соблюдение сроков выполнения работ. Проведено моделирование процесса подготовки научных публикаций до и после внедрения системы. Результаты исследования показывают снижение временных затрат, уменьшение количества итераций согласования и повышение уровня соблюдения сроков. Сделан вывод о целесообразности внедрения автоматизированных систем для повышения эффективности управления процессами научной деятельности.

Ключевые слова: автоматизация, научные публикации, управление процессами, согласование публикаций, эффективность, информационные системы, контроль сроков.

Elizarova N.Yu.
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department
of Dynamics of Processes and Control
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
enu1604@mail.ru
Klimkovskiy Ya.I.
Student
Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan

KlimkovskiyYI@stud.kai.ru

METHOD FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR MANAGING THE PREPARATION OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS

Abstract. The article addresses the problem of the lack of formalized methods for evaluating the efficiency of scientific publication preparation processes in organizations. It is shown that the use of fragmented communication tools between participants leads to increased time costs, complicates approval processes, and reduces control over task deadlines. An analysis of existing approaches to organizing the preparation of scientific publications is carried out, revealing the need for centralized information solutions. The paper proposes an automated system for managing the preparation of scientific publications, providing centralized storage of materials, document version control, as well as automation of approval processes and deadline management. Additionally, the functional capabilities of the system aimed at increasing transparency of interaction between participants and improving control over the stages of publication preparation are considered. A method for evaluating system efficiency is developed based on quantitative indicators, including publication preparation time, number of approval iterations, and compliance with deadlines. A simulation of the publication preparation process before and after system implementation is conducted. The results demonstrate a reduction in time costs, a decrease in the number of approval iterations, and an improvement in deadline compliance. It is concluded that the implementation of automated systems is advisable for improving the efficiency of managing scientific activity processes.

Keywords: automation, scientific publications, process management, publication approval, efficiency, information systems, deadline control.

Без оценки того, как работают автоматизированные системы управления подготовкой научных публикаций, их внедрение в научных организациях теряет смысл. А ведь именно эта оценка – критически важный шаг. Она позволяет понять: действительно ли новые инструменты упрощают рутину? Или, наоборот, создают лишнюю бюрократию? Сложно судить, насколько решения облегчают жизнь авторам и налаживают коммуникацию между всеми, кто участвует в согласовании статей, если не провести такой анализ.

На практике, когда речь заходит о подготовке и последующем согласовании научных статей, в подавляющем большинстве организаций эта работа обходится без какой-либо формальной оценки того, насколько она эффективна. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, отсутствуют специализированные информационные системы, которые бы это отслеживали. Во-вторых, крайне затруднительно собирать, а затем анализировать данные по всем ключевым этапам – от написания до финального утверждения публикации [1, 2].

В рамках разработанной системы реализованы механизмы сбора статистической информации и формирования отчётности. Их использование позволяет проводить количественную оценку эффективности системы, включая анализ временных затрат на подготовку публикаций, количества итераций согласования и соблюдения сроков выполнения работ [3].

Подготовка научных статей в организациях сопровождается рядом трудностей, которые существенно снижают эффективность работы. Одной из ключевых проблем является отсутствие единого информационного пространства для взаимодействия участников процесса, включая авторов и их научных руководителей.

В процессе подготовки публикаций обмен материалами и замечаниями осуществляется через различные каналы коммуникации, включая электронную почту, мессенджеры и облачные сервисы. Подобная ситуация – вовсе не редкость, когда речь заходит о работе над научными текстами. Однако разрозненность этих инструментов дробит информацию, а отслеживать весь процесс подготовки публикации становится крайне затруднительно. Например, проблема версионности: разные черновики оседают в разных местах. Это ведет к путанице, легко потерять свежий вариант, а правки начинают дублироваться [6, 7].

Отсутствие унифицированной управленческой схемы снижает согласованность действий всех участников процесса. Руководитель проекта зачастую не располагает инструментами для оперативного мониторинга этапов подготовки статьи, что затрудняет контроль внесённых правок и выполнение поставленных задач. В результате снижается прозрачность процессов и усложняется принятие управленческих решений.

Контроль за тем, когда именно нужно подготовить и сдать научные тексты, – это отдельная управленческая проблема. Если система сама не напоминает и не отслеживает дедлайны, риск их срыва существенно возрастает. В итоге – пропущенные даты сдачи материалов, что негативно влияет на публикационную активность учреждения.

Из-за перечисленных обстоятельств время, уходящее на подготовку статей, растёт. Согласование запутывается, его продуктивность падает. В результате сама подготовка превращается в куда более затратное по усилиям и хуже контролируемое мероприятие, нежели могло бы быть при внедрении профильных цифровых решений. Отсюда вытекает прямая необходимость сформулировать методику, позволяющую оценить, насколько результативно автоматизируется этот процесс.

В работе ставится задача: оценить, насколько результативно работает автоматизированная система, управляющая подготовкой научных публикаций. Для этого берутся показатели, замеренные до её запуска в организации, и сравниваются с теми, что получены после. В первую очередь нужно отобрать перечень таких метрик, которые дадут возможность измерить эффективность этой автоматизации в цифрах.

В качестве инструмента для решения обозначенной задачи предлагается внедрить автоматизированную систему управления подготовкой научных публикаций. Она берет на себя централизованное ведение каждого этапа этого процесса – от старта до финала [4, 5].

В основе разработанной системы лежит хранение научных статей и контроль версий. Любая правка, внесённая в рукопись, тут же записывается

в лог, поэтому историю изменений можно проследить без труда, а угроза утраты последней редакции документа минимизируется. Собранные в едином репозитории материалы открыты для каждого члена команды, что заметно облегчает процесс подготовки публикации.

В предлагаемой системе центральную роль играет модуль согласования статей. Именно он выстраивает коммуникацию автора с научным руководителем, замыкая её в общем цифровом поле. Руководитель вправе просмотреть присланные тексты, снабдить их замечаниями и советами, а затем либо завизировать материал, либо отправить его обратно на правку. Подобный подход делает процесс более открытым и заметно ускоряет прохождение этапов утверждения.

Автоматический мониторинг дедлайнов делает систему особенно полезной. Она отслеживает, когда нужно подготовить и отправить материал. Встроенный механизм оповещений позволяет пользователю лучше ориентироваться в сроках: напоминания приходят не единожды, а несколько раз до наступления контрольной даты. Такая схема стимулирует своевременное реагирование и существенно снижает вероятность нарушения сроков сдачи.

Ролевая модель доступа, встроенная в систему, позволяет гибко разграничивать полномочия: права пользователей жестко привязаны к их служебным функциям. Авторам и прочим пользователям даётся базовый уровень доступа. Они вправе запускать создание публикаций, загружать материалы, участвовать в подготовительных процессах. Научные руководители наделены расширенными правами. Они проверяют публикации, вносят замечания и принимают решения по их согласованию. Доступ к аналитике и отчётам со стороны руководства – механизм, позволяющий отслеживать публикационную активность сотрудников. Благодаря этому же инструменту контролируется и выполнение плановых показателей. Администратор получает полный доступ к системе. Именно на нём лежит управление учётными записями, разграничение ролей и контроль за стабильностью её функционирования.

Благодаря перечисленным функциям управление подготовкой научных публикаций становится централизованным. Единая платформа делает взаимодействие участников более прозрачным. В итоге удаётся ускорить прохождение отдельных этапов и добиться более слаженного согласования материалов.

Чтобы понять, насколько эффективно работает автоматизированная система управления подготовкой научных публикаций, разумно прибегнуть к нескольким количественным метрикам. Они дадут объективную картину того, какие изменения произошли в процедуре подготовки материалов.

Ключевыми метриками выступают: временные затраты на подготовку материала, число циклов, ушедших на согласование, и точность соблюдения дедлайнов.

Время, потраченное на подготовку статьи, чаще всего используется как главный критерий продуктивности. Именно этот показатель, а не что-то иное, наиболее отчетливо демонстрирует, сколько усилий ушло на написание и

последующее согласование научного текста. Авторы трактуют этот показатель в качестве временного отрезка, который отделяет старт работы над материалом от финального утверждения текста. Стартом служит, как правило, момент утверждения научного руководителя и начала работы автора над материалом. Финишная черта достигается, когда руководитель статью принял, и она готова к отправке в журнал. В этот промежуток времени укладывается вся последовательность действий: от написания материала до его утверждения, с внесением коррективов и последующей «шлифовкой». То, сколько времени займет этот этап, напрямую зависит от двух факторов: насколько сложен сам материал, и с какой интенсивностью стороны взаимодействуют друг с другом. Фиксированные сроки в данном случае отсутствуют. Внедрение автоматизированной системы, как ожидается, позволит снизить данный показатель. Этого удастся добиться благодаря упрощению коммуникаций и автоматизации ряда подготовительных этапов.

Число итераций согласования – ещё один значимый индикатор. Он показывает, сколько раз рукопись возвращалась автору на доработку в ходе его взаимодействия с научным руководителем. Итерация охватывает весь процесс движения рукописи: автор отправляет текст на проверку, затем следует рецензия, и, наконец, вносятся правки. Точкой отсчета служит момент, когда материал впервые отправляют на рецензирование. Завершается же весь этот процесс в тот момент, когда стороны приходят к согласованной финальной версии текста, и публикация получает одобрение. Каждую повторную отправку доработанной рукописи принято считать самостоятельным циклом рецензирования. Рост количества повторяющихся циклов нередко обусловлен слабой проработкой регламентов взаимодействия, а также отсутствием единой площадки для фиксации замечаний. Снижение данного показателя свидетельствует об улучшении взаимопонимания между участниками – рекомендации начинают восприниматься и учитываться более точно.

Доля своевременно подготовленных и отправленных публикаций – показатель, отражающий уровень соблюдения сроков. Его увеличение, как правило, свидетельствует об укреплении исполнительской дисциплины и усилении контроля за промежуточными стадиями. Существенную роль играет система напоминаний о дедлайнах, позволяющая своевременно включаться в работу и предотвращать нарушение сроков.

Показатель соблюдения сроков рассчитывается как отношение количества работ, направленных в установленный срок, к числу завершённых работ. При этом в расчёт включаются только те работы, по которым процесс подготовки завершён, что позволяет исключить влияние рукописей, находящихся в стадии разработки. Публикация считается своевременной, если её отправка произведена до установленного дедлайна, заданного журналом или конференцией; в противном случае работа классифицируется как просроченная. Значение показателя выражается в процентах. Дополнительно

может рассчитываться доля просроченных материалов, что позволяет проводить сопоставительный анализ и оценивать степень соблюдения временных регламентов.

На основе рассмотренных метрик можно оценить влияние автоматизированной системы на процесс подготовки научных публикаций.

Выбор именно этих показателей обусловлен необходимостью формирования комплексной картины процесса подготовки научных публикаций. Время подготовки фиксирует общую продолжительность работ и отражает рациональность организации процесса. Число итераций согласования характеризует интенсивность взаимодействия участников и степень отлаженности коммуникации. Показатель соблюдения сроков демонстрирует уровень дисциплины при выполнении задач и своевременность завершения работ. В совокупности данные метрики обеспечивают всестороннюю оценку функционирования автоматизированной системы, охватывая ключевые этапы подготовки научных публикаций.

Оценка эффективности системы проводилась на основе моделирования процесса подготовки научных публикаций. За основу был взят анализ стандартной процедуры подготовки научных статей, принятой в организации. Сравнивались два состояния одного процесса: подготовка научной статьи без использования автоматизированной системы и в условиях её применения.

В ходе анализа результатов моделирования процесса подготовки научных публикаций рассматривался типовой сценарий создания научной работы. Установлено, что при отсутствии специализированных программных решений на подготовку в среднем требуется 8–10 дней. При этом фактическая продолжительность может варьироваться в зависимости от уровня организации процесса и интенсивности взаимодействия участников. Моделирование показало, что использование автоматизированной системы позволяет сократить сроки подготовки до 5–6 дней. Это связано с упрощением обмена материалами и сокращением числа промежуточных операций.

Похожая ситуация наблюдается при анализе количества циклов доработки. В классической схеме этот параметр может достигать 4–5, что обусловлено, в основном, утратой правок и разрозненностью комментариев. При использовании автоматизированной системы количество итераций снижается до 2–3: каждое исправление фиксируется в едином хранилище и доступно для любого из соисполнителей.

Показатель соблюдения сроков также улучшается. До того, как заработал автоматизированный контроль, в срок укладывалось около 60–70% материалов. При использовании автоматизированной системы показатель увеличивается до 85–95%. Причина заключается в следующем: начали функционировать механизмы напоминаний, а также появилась возможность в режиме реального времени отслеживать стадию готовности каждой статьи.

Расширение функционала автоматизированной системы управления подготовкой научных публикаций представляется перспективным направлением её развития. В частности, интеграция с внешними научными базами

и издательскими платформами может обеспечить автоматизацию процесса подачи рукописей. Такая взаимосвязь существенно упростит взаимодействие с редакциями.

В систему могут быть встроены аналитические модули – они позволят оценивать публикационную активность сотрудников, выявлять проблемные этапы в подготовке статей и формировать предложения по совершенствованию процесса. Дополнительным направлением развития может стать внедрение интеллектуальных алгоритмов, способствующих принятию более обоснованных решений и повышению качества научных работ [8].

Выявлено, что в организациях отсутствуют чёткие формализованные критерии оценки результативности подготовки научных статей. Анализ существующих подходов показал необходимость использования специализированных инструментов, обеспечивающих централизованное управление данным процессом.

В работе представлена автоматизированная система управления подготовкой научных публикаций. Она ориентирована на повышение прозрачности взаимодействия между участниками, обеспечивает контроль версий документов и автоматизацию процедур согласования. Для оценки её эффективности разработан подход, основанный на трёх ключевых метриках: временные затраты на подготовку материалов, количество итераций согласования и уровень соблюдения дедлайнов.

Моделирование показало: внедрение автоматизации в процесс подготовки научных текстов оказывает положительное влияние. Управление данным процессом становится более эффективным, что подтверждается полученными результатами.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что автоматизация способствует ускорению процесса подготовки публикаций. Сокращается число циклов согласования, одновременно повышается уровень соблюдения сроков. Таким образом, управление подготовкой научных материалов становится более эффективным.

В целом предложенный подход позволяет сократить длительность подготовки статей и оптимизировать сам процесс. Его применение особенно целесообразно в образовательных и научно-исследовательских организациях, где требуется координация значительного числа участников и контроль выполнения задач на различных этапах.

Список литературы

1. Варламов С.В., Скородумов П.В. Информационная система управления деятельностью научной организации: на примере ИСЭРТ РАН // Вопросы территориального развития. 2015. № 5. С. 1–10,

2. Пиявский С.А., Елунин М.Н. Информационная система организации, мониторинга и управления коллективной научной деятельностью студентов в вузе // Вестник Самарского государственного технического университета. 2014. № 2. С. 120–127.

3. Резниченко О.С., Сиваков С.И., Резниченко Т.А. Методика автоматизированного формирования сведений о научных публикациях университета // Информационные технологии. 2019. № 5. С. 45–52.

4. De Castro P., Puuska H.-M. Research Information Management Systems: covering the whole research lifecycle // Proceedings of the EUNIS 2023 Congress. 2023.

5. Fina F., Proven J. Using a CRIS to support communication of research // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 106. P. 232–238.

6. Salem J. Process for selecting and implementing a manuscript management system // Learned Publishing. 2016. Vol. 29. No. 4. P. 287–294.

7. Галявиева М.С., Елизаров А.М., Линачёв Е.К. и др. Open Journal Systems в практике работы научного журнала // Научные и технические библиотеки. 2017. № 10, С. 45–54.

8. van Dinter R., Tekinerdogan B., Catal C. Automation of systematic literature reviews // Information and Software Technology. 2021. Vol. 136.

Анферова М.С.
старший преподаватель кафедры 317 «Управление инновациями»
Московский авиационный институт
Россия, Москва
gludkina@yandex.ru

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Аннотация. Для цифровизации процессов высокотехнологичных производств возникает потребность в оперативном выявлении зарождающихся технологических трендов и тенденций развития.

Ключевые слова: Мониторинг, цифровизация, технологические тренды, алгоритм, машинное обучение, кластеризация со смещением по времени, анализ текста, прогнозное управление.

Anferova M.S.
Senior Lecturer of the 317 Department of Innovation Management
Moscow Aviation Institute
Russia, Moscow
gludkina@yandex.ru

METHOD FOR PREDICTING TECHNOLOGICAL TRENDS AS A TOOL FOR DIGITAL TRANSFORMATION OF HIGH-TECH MANUFACTURING PROCESSES

Abstract. The digitalization of high-tech manufacturing processes creates a need for the rapid identification of emerging technological trends and development trajectories.

Keywords: Monitoring, digitalization, technological trends, algorithm, machine learning, time-shifted clustering, text analysis, predictive management.

Современный этап развития экономики характеризуется стремительным развитием науки и технологий, высокой динамикой появления новых научных результатов и инноваций.

Для цифровизации процессов управления качеством продукции на высокотехнологичном предприятии особое значение приобретает способность оперативно выявлять новые технологические тренды.

Интеграция методов интеллектуального анализа данных в системы менеджмента качества позволяет перейти от реактивного управления к прогнозному, что соответствует лучшим практикам устойчивого развития компаний.

Разрабатываемая методика должна обеспечивать:

- минимальное время выявления новых научных результатов и технологий в заданной предметной области;
- возможность формирования зарождающихся, в том числе междисциплинарных, технологических трендов;
- повышение точности и однозначности формулировок выявленных трендов для дальнейшего использования в системах поддержки принятия решений.

Нерешённость проблемы обработки больших данных при определении технологических трендов и оценке динамики их развития способна привести к существенному технологическому отставанию, замедлению исследовательского прогресса, а также к потере перспективных возможностей для бизнеса.

Был проведен анализ существующих методов выявления новых трендов (таблица).

Таблица

Анализ методов выявления новых трендов

№	Метод	Преимущества	Недостатки
1	*2*	*3*	*4*
1	Библиометрический анализ	Предоставляет информацию о структуре цитирования и влиянии научных статей	Не всегда правдиво отображает значимость научных работ и выявленных трендов т.к. анализирует слишком разрозненную информацию. Не способен проанализировать и выявить весь спектр новых тенденций
2	Анализ текста	Выявляет релевантные ключевые слова и темы в научных статьях	Не в состоянии уловить контекст или нюансы научного языка
3	Анализ социальных сетей	Выявляет связи и сотрудничество между исследователями	Не охватывает все возникающие тенденций, сравнивает слишком разрозненную информацию между собой, что приводит к формированию ложных трендов
4	Анализ цитирования	Пригоден для выявления научного фронта на относительно позднем этапе, а не в самый момент его возникновения	Возникает временная задержка – ограничивается возможность учесть новые публикации

Окончание таблицы

1	*2*	*3*	*4*
	Алгоритм Лувена	Определяет группу узлов в графе, которые наиболее тесно связаны друг с другом их идентификация может дать представление о структуре и функциях сети	Необходимо учитывать размер и структуру сети или базы данных, т.к. метод стремится сбалансировать объем информации, используемой для формирования трендов, что может привести к не верной интерпретации
6	Рекуррентные нейронные сети (RNN)	Эффективна при моделировании последовательных данных, таких как временные ряды	Вычисляет выходные данные для каждого входного сигнала без учета связи между предыдущими и новыми вычислениями, что затрудняет работу сетей такого типа

Для преодоления отмеченных выше недостатков существующих методов в данной статье предлагается новый подход к формированию технологических трендов. В основе предлагаемой методики лежит процедура определения и анализа ключевых слов в массиве разнородных данных.

В работах [Анферова, Белевцев 2021, Анферова, Белевцев 2022] был разработан алгоритм кластеризации, включающий в себя следующие основные этапы:

- разделение данных по языкам;
- очистка данных с помощью токенизации, лемматизации и стемминга;
- векторизация;
- извлечение ключевых слов;

В результате работы алгоритма выделяются опорные темы документов, хранящихся в базе данных, а также процентное соотношение каждой темы в конкретном документе. Однако практическая реализация алгоритма встречает значительные затруднения в связи:

- с постоянным возрастающим объемом данных и ростом времени их обработки;

Кроме того:

- не отражается развитие трендов во времени;
- не учитывается изменение частоты упоминания тренда и распределения ключевых слов с течением времени;
- теряется объективность результата

Для преодоления отмеченных выше недостатков в предлагаемой методике реализована процедура кластеризации документов с учетом временного фактора.

В разработанной методике используется понятие временного фактора – T.

Необходимо рассчитать коэффициент временной погрешности. Для этого определяем необходимую дату публикаций и высчитываем разницу по времени с каждым сравниваемым документом.

Таким образом происходит сортировка и объединение документов по времени, что позволит сравнивать данные из нескольких источников.

На Рисунке 1 представлен алгоритм определения технологических трендов с учётом введённого временного коэффициента.

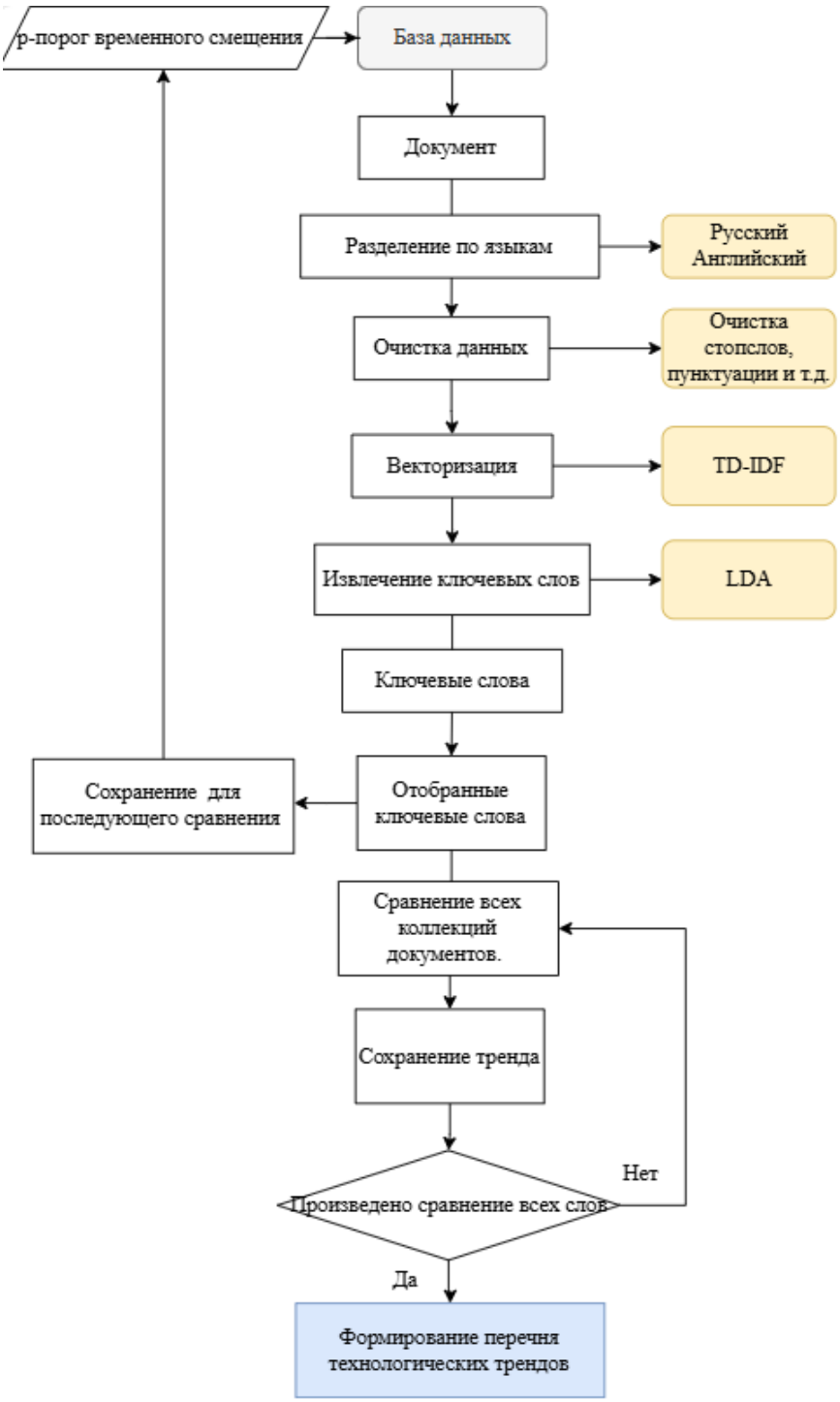


Рис. 1. Алгоритм определения технологических трендов

Опишем основные этапы предлагаемого алгоритма:

Предварительная обработка документов. На данном этапе выполняется токенизация и векторизация каждого документа. В процессе векторизации применяется инвертированный индекс с мерой TF-IDF, обеспечивающий быстрый поиск по коллекции. Дополнительное поле, содержащее частоту термов, позволяет использовать индекс для ранжирования, а также в качестве кэша векторов документов в специализированной базе данных. Итогом

этапа является формирование словарного запаса объёмом L уникальных слов.

Построение матрицы «документы – термины». Строится матрица размерностью $m \times n$, где

m – общее число обрабатываемых документов

n – объём сформированного словарного запаса.

Данная операция позволяет исключить нерелевантные термины и представить данные в форме, пригодной для дальнейшего анализа.

Однако векторные представления тезисов являются объемными и разбросанными, что приводит к созданию проблем для решения задачи кластеризации.

С целью их преодоления:

- проводится кластеризация с привязкой по времени.

Фактор времени добавляется в качестве параметра перед кластеризацией.

Вводится автоматически настраиваемый порог и называем его параметром смещения – p для контроля относительного влияния года публикации на значения матрицы.

Степень смещения может варьироваться в соответствии с потребностями пользователя – более высокое смещение может использоваться для локализации тематических кластеров в определенное время, в то время как более низкие значения смещения могут просто использоваться в качестве дополнительного фактора для улучшения интерпретируемости стандартного тематического моделирования.

На следующем этапе применяется алгоритм LDA:

Определяется фиксированный набор тем, состоящих из представленных (неизвестных) наборов слов.

LDA сопоставляет все (известные) документы с (неизвестными) темами таким образом, чтобы слова в каждом документе были в основном захвачены этими темами [Deng, Liu, Xu, Choi, Zhang, Tian, Zhang, Liang, Qin, Wang, 2020].

На следующем этапе LDA от слов, составляющих документ, и пытается угадать темы, которые привели к данному расположению слов.

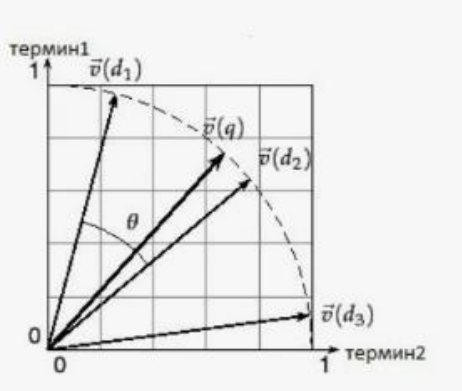
Результаты по каждому временному периоду сохраняются. При добавлении новых результатов они сравниваются между собой. В итоге остаются одинаковые значения.

Для получения новой матрицы документов для кластеризации (уравнение (1)) необходимо последовательно умножить год публикации на величину смещения.

$$A_{(m+p)*(n+p)} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1(n+p)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(m+p)1} & \cdots & a_{(m+p)(n+p)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Методика выявления этапа научного фронта предполагает сравнение кластеров публикаций за два и более равных последовательных промежутка времени.

Определение косинусной меры сходства. Она позволяет оценить степень сходства двух векторов слов. Если представить перечень тем, как векторы в n-мерном пространстве косинус угла между векторами – это и есть мера их сходства (Рисунок 2, Уравнение (2)).



	Данные 1	*Данные 2*	*…*	*Данные n*
Слово 1	$V_{1,1}$	$V_{2,1}$		$V_{n,1}$
Слово 2	$V_{1,2}$	$V_{2,2}$		$V_{n,2}$
…				
Слово m	$V_{1,m}$	$V_{2,m}$		$V_{n,m}$

Рис. 2. Косинусная мера сходства S_c

$$S_c(\mathrm{D1}, \mathrm{D2}, \ldots \mathrm{Dn}) = \frac{(V_{1,1}V_{2,1}\ldots V_{n,1}+V_{1,2}V_{2,2}\ldots V_{n,2}+\cdots+V_{1,m}V_{2,m}\ldots V_{n,m}}{\sqrt{V_{1,1}^2+V_{1,2}^2..+V_{1,m}^2}*\sqrt{V_{2,1}^2+V_{2,2}^2..+V_{2,m}^2}*\ldots.*\sqrt{V_{n,1}^2+V_{n,2}^2..+V_{n,m}^2}} \quad (2)$$

Построение графика, в котором узлами являются темы из архива данных Dt, а ребра создаются с помощью узла из модели Dt+1 с максимальным косинусоидальным сходством.

Определение активности отдельных тенденций за каждые два месяца. Для этого необходимо:

Оценить количество документов в каждой временной точке.

Нанести на график активность каждой тенденции.

Отследить их поведение с течением времени.

В итоге получаем сравнительную оценку сходства между первыми двумя соседними моделями.

В результате формируются технологические тренды для дальнейшего анализа с возможностью посмотреть промежуточные коллекции.

Представленная методика обеспечивает решение задачи, связанной с формированием технологических трендов:

Во-первых, использование заданного временного интервала позволяет:

- снизить объем обрабатываемых данных;
- повысить эффективность вычислений;
- уменьшить время обработки запроса.

Во-вторых, разбиение набора данных и ввод временного смещения позволяет:

- отслеживать тенденции с течением времени;
- предоставлять информацию о появлении, эволюции и снижении тренда.

В-третьих, использование моделей top2vec и графических представлений:

- облегчает идентификацию трендов;
- визуализирует тенденции доступным для интерпретации способом.

Разработанная методика может быть интегрирована в системы менеджмента качества предприятия в качестве модуля мониторинга и прогнозирования технологических рисков и возможностей, что обеспечивает цифровую поддержку принятия стратегических решений и повышает адаптивность систем менеджмента качества к быстрым изменениям внешней среды.

Список литературы

1. Анферова М. С., Белевцев А. М. Анализ направлений развития технологий мониторинга в условиях большого объёма неструктурированной информации // XXIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко //”Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2020»
2. Анферова М. С., Белевцев А. М. Разработка алгоритма определения опорных тем для решения задач стратегического анализа // Сборник докладов. Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» «КОМТЕХ-2022», 2022г. с 132–138
3. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения //Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» /Рязань: РГРТУ, 2018.
4. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ требований и разработка алгоритмов интеллектуальных сервисов мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. №3 2022г с 119 – 129.
5. Анферова М.С., Белевцев А.М. Общая концепция создания технологии интеллектуального поиска информации в сетях общего и специального назначения // XXV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко “Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2021».
6. Анферова М.С., Белевцев А.М. Поисковые роботы для автоматизированного мониторинга информации в сетях общего и специального назначения // 18-я Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» 2019г.
7. Анферова М.С., Белевцев А.М. Разработка алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации // Известия ЮФУ. Технические науки. №3 2021г с 6 – 17.

8. Анферова М.С., Белевцев А.М., Белевцев А.А. Методика анализа развития зарождающихся технологий и технологических фронтов // Известия ЮФУ. Технические науки. №4 2023г с 87 – 96.

9. Белевцев А.А, Белевцев А.М, Балыбердин В.А. Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий. Известия ЮФУ» № 6, 2022 г.

10. Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Белевцев А.А., Балыбердин В.А.. Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // Наукоемкие технологии т. 20 №3 2019г с. 24–29.

11. Мазов Н.А., Гуреев В.Н., Глинских В.Н. Приоритетные научные направления с позиции библиометрических исследований. *Труды ГПНТБ СО РАН*. 2021;(1):89–94. TY – JOUR

12. Passas, Ioannis Bibliometric Analysis: The Main Steps// Encyclopedia – 2024/06/20 VL – 4, P – 1014 – 1025.

13. Sahar Behpour et al. “Automatic trend detection: Time-biased document clustering”. In: Knowledge-Based Systems 220 (2021)

14. Tomas Mikolov et al. “Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space”. In: International Conference on Learning Representations. 2013.

15. Z. Deng, R. Liu, P. Xu, K. Choi, W. Zhang, X. Tian, T. Zhang, L. Liang, B. Qin, S. Wang, Multi-view clustering with the cooperation of visible and hidden views, IEEE Trans. Knowl. Data Eng. (2020).

Савостикова О.Г.
старший преподаватель кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Соловьева П.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Polina120199@yandex.ru

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НА ПРЕДПРИЯТИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА ЦИФРОВЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные вопросы трансформации метрологического обеспечения предприятий в условиях перехода к Индустрии 4.0, Методологическую основу исследования составляют системный и сравнительный анализ, а также методы оценки неопределённости измерений. Акцентируется внимание на том, что замена аналоговых средств измерений цифровыми является не просто техническим обновлением оборудования, а фундаментальной перестройкой всей системы управления качеством. Анализируются возможности цифровизации, такие как улучшение точности измерений и повышение эффективности работы предприятия. Выявляются новые вызовы: разночтение значения терминов, кибербезопасность, острая нехватка квалифицированных кадров. Особое внимание уделяется практическим аспектам использования современного оборудования. Подробно рассматриваются специфические задачи метрологического сопровождения аддитивных технологий, в частности применение компьютерной

рентгеновской томографии для анализа внутренних структур и дефектов изделий. Проводится чёткое разграничение между маркетинговым понятием «прецизионность» и метрологическим термином «точность». В заключении обосновывается вывод о том, что успех цифровой трансформации зависит от комплексного подхода, объединяющего современную приборную базу, готовность инфраструктуры предприятий и развитие кадрового потенциала. Статья может представлять практический интерес для специалистов-метрологов и руководителей предприятий.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, цифровые средства измерений, Индустрия 4.0, модернизация, предприятие.

Savostikova O.G.
Senior Lecturer of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Solovyeva P.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Polina120199@yandex.ru

METROLOGICAL SUPPORT AT AN ENTERPRISE DURING THE TRANSITION TO DIGITAL MEASUREMENT INSTRUMENTS

Abstract. This article examines current issues related to the transformation of enterprise metrological support in the context of the transition to Industry 4.0, The research methodological basis is based on systems and comparative analysis, as well as methods for estimating measurement uncertainty. It emphasizes that replacing analog measuring instruments with digital ones is not simply a technical upgrade of equipment, but a fundamental restructuring of the entire quality management system. The opportunities offered by digitalization, such as improved measurement accuracy and increased enterprise efficiency, are analyzed. New challenges are identified: misinterpretation of terminology, cybersecurity, and an acute shortage of qualified personnel. Particular attention is paid to the practical aspects of using modern equipment. The specific challenges of metrological support for additive manufacturing are examined in detail, in particular the use of computed X-ray tomography for the analysis of internal structures and defects of products. A clear distinction is made between the marketing term «precision» and the metrological term «accuracy». The conclusion substantiates that the success of digital transformation depends on a comprehensive approach that integrates a modern instrumentation base, the readiness of enterprise infrastructure, and the development of human resources. This article may be of practical interest to metrology specialists and enterprise managers.

Keywords: metrological support, digital measuring instruments, Industry 4.0, modernization, enterprise.

Современная промышленность вступила в фазу глобальной цифровой трансформации. Но модернизация невозможна без качественного изменения измерительной базы, перехода от традиционных аналоговых приборов к цифровым средствам измерений. Этот процесс – не просто техническое обновление оборудования, а фундаментальная перестройка всей системы метрологического обеспечения любого предприятия.

Внедрение цифровых систем даёт производству новые возможности: автоматический сбор данных в реальном времени, прогностическую диагностику оборудования, формирование единой цифровой среды управления. Но это создаёт и ряд новых вызовов: обеспечение единства измерений, кибербезопасность, изменение методик поверки и калибровки, повышение квалификации персонала.

В данной статье рассматриваются ключевые аспекты адаптации предприятия к условиям цифровизации, анализируются риски переходного периода – всё это позволит создать надёжную метрологическую инфраструктуру нового поколения.

Методами исследования в рамках данной работы являются системный анализ (для рассмотрения взаимосвязей между метрологическим обеспечением и работой предприятия), сравнительный анализ (для сопоставления традиционных методов учёта и новых автоматизированных систем), а также оценивание неопределённости измерений (при анализе применения цифровых алгоритмов для расчёта погрешностей в реальном времени).

Цифровизация производства не могла обойти стороной метрологию и метрологическое обеспечение. Метрологическое обеспечение – это неотъемлемый элемент любого производства в любой промышленной отрасли. Но процесс цифровизации не заканчивается внедрением программного обеспечения и внесением в базу данных необходимых сведений. Цифровизация – это процесс непрерывного обмена данными между различными сферами деятельности, организациями и структурными подразделениями посредством единого информационного пространства [5]. Важно, чтобы программное обеспечение интегрировалось в инфраструктуру предприятия и информационную среду, в системы отраслевого и федерального статуса.

Переход предприятий к цифровым производственным технологиям требует включения сил отраслевой науки, чтобы выработать новые научно-технологические решения. В постиндустриальную эпоху результаты измерений, выполняемых с наилучшей возможной точностью, применяются на всех стадиях производственного цикла – от проектирования до утилизации.

Особенности метрологического обеспечения процессов обуславливаются новыми принципами организации производства. Конечно, речь идет о производственных процессах, характерных для четвёртой промышленной революции или, как её ещё называют, Индустрии 4.0,

Важной составляющей Индустрии 4.0 выступает не продукт, а данные. Создаются умные цифровые производства, устройства и изделия которых взаимодействуют, обеспечивая персонализированный выпуск продукции. Цифровизация производства связана с большими массивами данных, которые необходимо обрабатывать. Для этого нужны специальные информационные системы и программное обеспечение, средства беспроводной передачи данных, облачные сервисы для хранения данных и обмена ими.

Производства сегодня определяются рядом факторов. Во-первых, метрологическое обеспечение производства реализуется в рамках обеспечения

единства измерений (ОЕИ). В то же время в промышленности отсутствует единая методология по понятию, организации, целям, задачам и реализации метрологического обеспечения в процессе производства. Устаревает база метрологического обеспечения производственных технологий, а на предприятиях с долгой историей быстрая модернизация устоявшейся технической инфраструктуры почти невозможна. Несмотря на свою важность, метрологическое обеспечение оценки соответствия продукции в процессе производства не рассматривается многими руководителями как ключевая часть обеспечения качества и конкурентоспособности продукции. Кроме того, отсутствует единое руководство метрологическим обеспечением и процессами измерений в процессе производства, наблюдается нехватка специалистов по метрологии, имеющих профильное образование.

Можно выделить ряд особенностей метрологического сопровождения производственных процессов. Этап получения информации о физических и геометрических параметрах производимых материальных объектов в цифровом производстве рассматривается в основном лишь в момент «оцифровки» прототипа дублируемого изделия, при этом как средство быстрого создания трёхмерной модели объекта предлагаются варианты проекционной фотограмметрии или лазерного сканирования. Широкое распространение упоминания данного способа измерения геометрии вместе со спецификой маркетинговой политики поставщиков производственного оборудования, которые заявляют о микронной точности и «сверхпрецизионности» своих моделей станков, создают у потребителя ощущение, что контроль качества изготовления обеспечивается обрабатывающим центром. На практике это далеко не всегда так, поэтому необходимо чётко разграничивать перечисленные понятия.

Из-за высоких нагрузок, возникающих при обработке изделий, файлы программной компенсации актуальны лишь в течение ограниченного времени, а выход точностных характеристик за пределы допуска может быть неравномерным при колебаниях нагрузок. В связи с этим на современных предприятиях нужно применять координатно-измерительные машины (КИМ). При применении КИМ вероятность ошибок значительно падает ввиду малых нагрузок в штатном режиме измерений.

Также важно помнить и о различии самих философий механообработки и измерений. Например, для механообработки важнейшим параметром выступает так называемая «прецизионность», выдаваемая продавцами оборудования в маркетинговых целях за точность. Следует понимать, что на самом деле прецизионность – это близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при измерении или изготовлении объектов (одного и того же или аналогичных) при заданных условиях. Также не нужно забывать, что сами по себе проекционные методы измерения и лазерные дальномеры не имеют высокой точности, давая стабильные погрешности измерений не менее 30–40 мкм даже в условиях, близким к идеальным [2]. Точность – это характеристика именно метрологического

оборудования. Она определяется как близость измеренных или полученных значений к точному значению измеряемой величины.

Отдельно хочется выделить внесение поправок в траекторию перемещения станка. Данную задачу можно поделить на контроль точности позиционирования линейных и поворотных осей многоосевых обрабатывающих центров с ЧПУ, контроль формы траектории перемещения линейных и поворотных осей, контроль взаимного положения осей в пространстве. Даже для оборудования всего с 3 осями линейного перемещения достигаемое количество контролируемых параметров – 21, а при наличии 2 дополнительных поворотных осей глобусного стола параметры возрастают до 30, Задача ускорения процесса контроля нескольких параметров геометрии подвижных элементов оборудования с высокой точностью решается производителями измерительных интерференционных систем. Калибровочная система может решать задачу по оценке точности перемещений вдоль линейных координат одновременно по 6 степеням свободы, что вместе с применяемыми дополнительными системами сокращает общее число применяемых оптических схем при проверке обрабатывающего центра с 8 до 3, а время проверки сокращает с нескольких дней до одного. Кроме того, процедуры промежуточного контроля станка для удостоверения его соответствия точностным требованиям между калибровочными измерениями могут занимать всего до 2 часов.

Важным аспектом является цифровое послойное производство деталей со сколь угодно сложной геометрией. Однако при всех плюсах инноваций в трёхмерной печати есть множество проблем: недостаток стандартизации процесса, непредсказуемость свойств конечного продукта, отсутствие оптимизации режимов обработки, низкая взаимозаменяемость оборудования от разных производителей. В связи с этим метрологическое обеспечение аддитивных технологий в рамках готовых промышленных установок имеет большее значение, чем в классической механообработке. Например, для технологии селективного лазерного сплавления металлических порошков важнейшим атрибутом работы системы является пирометрический датчик температуры, которые точечно оценивает количество тепла в зоне расплавления внутри лазерного пятна.

Немалое влияние на эксплуатационные свойства изделия в аддитивном производстве имеет как внутренняя подповерхностная геометрия, так и внутренние дефекты, имеющие специфический характер для данного типа изготовления продукции. В связи с этим, кроме традиционных методов контроля поверхностной геометрии и подповерхностных дефектов, возникает потребность в новом методе измерения, который лежит на стыке материаловедения и метрологии, – компьютерной рентгеновской томографии, применяемой при изучении внутренних трёхмерных макро- и микроструктур с пространственным разрешением, достигающим 1 мкм (хотя и с большей погрешностью от 5 мкм).

Обеспечение информационной безопасности цифрового производства – задача метрологической службы. Информационная безопасность сегодня имеет ключевое значение. Так, например, был проведён эксперимент по дистанционному взлому промышленного робота-манипулятора ABB IRB140, Исследователи перепрограммировали робота в процессе аддитивного производства критически важных компонентов. Из-за изменений файлов конфигурации траектория движения, воспринимаемая роботом как прямая линия, отклонялась от прямолинейности до 2 мм, что при отсутствии выходного контроля и проверки качества поставщиком привело бы к аварии [2]. Наличие метрологической службы на предприятии является дополнительным уровнем информационной безопасности.

Своевременная поверка средств измерений помогает предприятию избежать лишних затрат. Чтобы следить за точностью, износом и ремонтом оборудования, в организациях имеются службы технического контроля, где работают инженеры по метрологии. В их обязанности входит отслеживание сроков поверки. Для более эффективной работы специалистам нужны современные информационные системы [1], которые обеспечивают бесперебойную работу предприятия, снижая число погрешностей, характерных для устаревших средств измерения.

Перед внедрением системы метрологического облака нужно провести предварительные расчёты выгод и потерь. Новые сервисы должны обеспечить упрощение ввода при высокой надёжности хранения и обработки данных о средствах измерений, стандартных образцах, измерительной информации. Без наличия выгоды пользователи предпочтут традиционные инструменты [3].

Переход на цифровые средства измерений тормозит дефицит кадров. Метрологов с профильным образованием в авиационной промышленности не более 40%, а в общем машиностроении всего около 10% [4]. Руководители предприятий должны понимать значимость метрологического обеспечения, формируя запрос на подготовку кадров метрологов.

Таким образом, внедрение цифровых технологий в метрологию требует комплексного подхода. Успех перехода зависит не только от закупки современных приборов, но и от готовности инфраструктуры предприятия, квалификации персонала. Несмотря на ряд проблем, преимущества в виде прозрачности измерений и высокой скорости обработки данных делают процесс неизбежным. Системный подход к цифровой трансформации метрологического обеспечения – это залог стабильного развития предприятия в условиях Индустрии 4.0, Цифровизация метрологии становится фундаментом для создания «умного» производства и обеспечения высокой конкурентоспособности продукции.

Список литературы

1. Валиев Л.Р., Миньков С.Л. Цифровая трансформация метрологического обеспечения средств измерений // Инноватика-2021: сборник материалов XVII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 22–23 апреля 2021 г., г. Томск, Россия. Томск, 2021. С. 362–364.
2. Ковальский М.Г., Ромаш Е.В., Стебулянин М.М. Метрологическое обеспечение цифрового производства // Главный метролог. 2019. № 6 (111). С. 12–18.
3. Попов А.А. Цифровизация обеспечения метрологической прослеживаемости средств измерений и стандартных образцов через облачные технологии: современное состояние и перспективы развития // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18. № 3. С. 57–70,
4. Пронякин В.И., Комшин А.С. Цифровая трансформация метрологии и метрологическое обеспечение в промышленности // Станкоинструмент. 2022. № 4 (029). С. 68–74.
5. Ребрушкин С.С. Метрологическое обеспечение в эпоху цифровой трансформации // ИСУП. 2021. № 3 (93). С. 151–153.

Полкуев Р.Н.
аспирант
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва
Россия, Рыбинск
rpolkuev@yandex.ru
Иванова И.В.
к.т.н., доцент кафедры организации производства и управления качества
Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьёва
Россия, Рыбинск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО КОНТУРА КАЧЕСТВА ТРАНСФЕРА ТЕХНОЛОГИЙ В ЭКОСИСТЕМЕ «УНИВЕРСИТЕТ – МИП – ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР» (НА ПРИМЕРЕ РГАТУ ИМЕНИ П.А. СОЛОВЬЁВА)

Аннотация. В статье рассмотрена проблема институционального и информационного разрыва между системами менеджмента качества вуза, малого инновационного предприятия (МИП) и промышленного производства в процессе коммерциализации научных разработок. Показано, что несоответствие стандартов документирования, валидации и прослеживаемости результатов НИОКР требованиям заводской СМК приводит к дублированию контрольных процедур и увеличению сроков внедрения технологий в 1,5–2 раза. Целью исследования является разработка архитектуры цифрового контура качества, интегрирующего процессы систем менеджмента качества трех типов организаций на основе стандартизации данных и автоматизации документооборота. Методология включает процессный подход, анализ нормативной базы (ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ РВ 0015-002, ЕСКД) и моделирование потоков данных о качестве на примере взаимодействия РГАТУ им. П.А. Соловьёва с индустриальными партнерами. Предложена модель цифрового контура, включающая единую среду нормативно-справочной информации, цифровой паспорт изделия с электронной подписью и шлюз конвертации данных в формат заводской

PDM/PLM-системы. Практическая значимость работы заключается в сокращении транзакционных издержек на передачу конструкторской документации и результатов испытаний, а также в формировании доверенной цифровой среды для ускоренной коммерциализации вузовских разработок в условиях технологического суверенитета.

Ключевые слова: цифровой контур качества, трансфер технологий, система менеджмента качества, малое инновационное предприятие, цифровая экосистема, стандартизация данных, прослеживаемость результатов НИОКР, PDM/PLM-системы.

Polkuev R.N.
Postgraduate Student
Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov
Russia, Rybinsk
rpolkuev@yandex.ru
Ivanova I.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production Organization and Quality Management
Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov
Russia, Rybinsk

MODELING A DIGITAL QUALITY LOOP FOR TECHNOLOGY TRANSFER IN THE ECOSYSTEM «UNIVERSITY – SIE – INDUSTRIAL PARTNER» (USING RSATU NAMED AFTER P.A. SOLOVYOV AS AN EXAMPLE)

Abstract. The article addresses the problem of institutional and informational gaps between quality management systems of universities, small innovative enterprises (SIE), and industrial production in the process of commercializing scientific developments. It is shown that the mismatch between documentation standards, validation, and traceability of R&D results with factory QMS requirements leads to duplication of control procedures and an increase in technology implementation timelines by 1.5–2 times. The aim of the research is to develop an architecture of a digital quality loop that integrates quality management processes of three types of organizations based on data standardization and automation of document circulation. The methodology includes a process approach, analysis of the regulatory framework (GOST R ISO 9001, GOST RV 0015-002, ESKD), and modeling of data flows regarding quality using the example of interaction between Rybinsk State Aviation Technical University with industrial partners. A digital quality loop model is proposed that includes a unified environment for regulatory reference information, a digital product passport with electronic signature, and a data conversion gateway to the factory PDM/PLM system format. The practical significance of the work lies in reducing transaction costs for the transfer of design documentation and test results, as well as in creating a trusted digital environment for accelerated commercialization of university developments under conditions of technological sovereignty.

Keywords: digital quality loop, technology transfer, quality management system, small innovative enterprise, digital ecosystem, data standardization, R&D results traceability, PDM/PLM systems.

Актуальность исследования определяется национальным курсом на достижение технологического суверенитета в условиях геополитической нестабильности и внешних ограничений на доступ к иностранным технологиям. Федеральный закон № 217-ФЗ «О внесении изменений в отдельные

законодательные акты Российской Федерации по вопросам создания бюджетными научными и образовательными учреждениями хозяйственных обществ» предусматривает значительное расширение роли высших учебных заведений и малых инновационных предприятий (МИП) в процессе коммерциализации научных разработок и их трансфера в промышленное производство [3, 11].

Однако практика взаимодействия высших учебных заведений с промышленными партнерами показывает, что переход научного результата от стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) к стадии промышленного производства сталкивается с серьезными препятствиями, связанными, прежде всего, с отсутствием единых подходов к управлению качеством технологии и полной прослеживаемостью данных о ее качественных характеристиках на всех этапах разработки и внедрения [5, 9].

Центральная проблема, выявленная в ходе анализа практики коммерциализации технологий, состоит в существовании так называемой «коллизии стандартов качества». Вузовские системы менеджмента качества (СМК), как правило, ориентированы на требования ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и нормирование исследовательской деятельности. Малые инновационные предприятия используют упрощенные процедуры документирования. Промышленные предприятия, особенно в оборонно-промышленном комплексе (ОПК), подчиняются более строгим специальным требованиям (ГОСТ РВ 0015-002-2020, специальные регламенты государственных заказчиков) [1, 2, 10]. Это несоответствие в требованиях приводит к необходимости пересоставления конструкторской документации (КД) и результатов испытаний (РИД), повторных испытаний образцов в условиях, соответствующих требованиям промышленного производства, и многократной валидации результатов НИОКР, что увеличивает сроки коммерциализации на 40–100% и значительно увеличивает затраты на процесс трансфера технологий [13].

Объект исследования – процессы взаимодействия вуза (на примере ФГБОУ ВО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва»), созданных при нем малых инновационных предприятий и промышленных партнеров (на примере авиадвигателестроительного производственного кластера Ярославской области).

Предмет исследования – модель цифрового контура качества, обеспечивающая сквозную прослеживаемость всех данных о качестве и характеристиках технологии: от технического задания и плана НИОКР через результаты испытаний и валидации к документам на производство и серийный выпуск продукции.

Цель статьи – разработка архитектуры целевой модели (TO-BE) взаимодействия систем менеджмента качества трех типов организаций при трансфере технологий, а также демонстрация возможностей цифровизации в значительном снижении транзакционных издержек и сокращении сроков коммерциализации научных разработок.

Исследование базируется на комбинировании нескольких методологических подходов, позволяющих достичь полноты и объективности анализа:

Процессный подход. Для описания текущего состояния (AS-IS) и целевой архитектуры (TO-BE) используется нотация IDEF0 (интегрированная модель функций и данных) и диаграммы потоков данных (DFD) [8]. Это позволяет выявить точки разрыва в документообороте и определить необходимые интеграционные решения.

Нормативно-правовой анализ. Проведено сопоставление требований стандартов и нормативных документов [1, 2]: ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (управление документированной информацией и процессами СМК), ГОСТ РВ 0015-002-2020 (специальные требования к СМК предприятий оборонно-промышленного комплекса), ЕСКД/ЕСТД (требования к конструкторской и технологической документации).

Анализ нормативной документации организаций. Изучены внутренние регламенты и процедуры РГАТУ, положения о малых инновационных предприятиях, типовые договоры на выполнение НИОКР с промышленными партнерами, требования ПАО «ОДК-Сатурн» и других предприятий авиадвигателестроительного сектора к технической документации и процедурам валидации технологий [3, 11, 13].

Моделирование архитектуры решения. Построена функциональная архитектура цифрового контура качества [7, 12] с выделением четырех уровней архитектуры: уровень данных (нормативно-справочная информация), уровень приложений (системы документирования и анализа), интеграционный слой (API и шлюзы конвертации) и уровень пользовательских процессов.

Диагностика текущего состояния (AS-IS) и выявленные проблемы

Анализ взаимодействия РГАТУ с промышленными партнерами выявил три основных уровня разрывов в управлении качеством, препятствующих эффективному трансферу технологий:

Разрыв в нормативно-справочной информации (НСИ). Каждая организация хранит справочники материалов, стандартов, ГОСТов и технических норм в разных форматах и с разной актуальностью. Вуз ориентируется на общегосударственные базы и РОССТАНДАРТ, МИП может использовать облачные сервисы и коммерческие базы данных, завод имеет собственное хранилище, синхронизированное с расписанием обновлений в соответствии с требованиями заказчиков. Это приводит к разночтениям при подготовке конструкторской документации и различным интерпретациям требований [1, 2].

Разрыв в формах документирования качества и результатов испытаний. РГАТУ оформляет результаты испытаний в виде научно-технических отчетов по внутренней методике, ориентированной на требования вузовской СМК. МИП может использовать форму, согласованную с вузом или заимствованную из международных стандартов. Промышленный завод требует заполнения специализированных форм протоколов испытаний, непосредственно связанных с его PDM/PLM-системой и требованиями приемки продукции и технологий [7, 10].

Разрыв в процедурах валидации, верификации и прослеживаемости. Отсутствует единая цепочка полной прослеживаемости результатов НИОКР от технического задания и плана-графика через результаты испытаний к документам на производство и управление изменениями. Нет механизма обратной связи о судьбе технологии на стадии промышленного производства, что затрудняет совершенствование вузовской СМК и повышение качества будущих разработок [6, 12].

Следствием этих разрывов являются: дублирование испытаний (вуз проводит испытания по его методикам, затем завод повторяет испытания в своих условиях), пересоставление конструкторской документации вручную (отнимающее до 30% рабочего времени технолога), отсутствие доверия к данным о качестве (каждая сторона требует независимой верификации результатов), увеличение общего времени цикла разработки и внедрения на 40–100%.

Архитектура целевой модели цифрового контура качества (TO-BE)

Предлагаемая архитектура цифрового контура качества состоит из четырех ключевых компонентов (табл.), которые в совокупности обеспечивают интеграцию и унификацию процессов управления качеством во всей экосистеме вуз – МИП – промышленность [7, 12].

Таблица

Архитектура цифрового контура

Компонент	Описание функции
Единая НСИ	Облачная платформа хранения стандартов и технических характеристик, оснащённая единым реестром версий и обеспечивающая прозрачный доступ для вуза, МИП и индустриального партнёра.
Цифровой паспорт	Электронный журнал со сквозным идентификатором изделия, результатами испытаний с электронной подписью, хранилище 3D-моделей и технической документации
Шлюз интеграции	API для автоматической конвертации данных из цифрового паспорта в формат PDM/PLM-системы завода в соответствии с ГОСТ Р 2.901
Управление несоответствиями	Единая база данных дефектов и несоответствий, выявленных при НИОКР и в производстве, с анализом причин и обратной связью для совершенствования СМК

Процессная модель взаимодействия организаций

Целевая модель (TO-BE) основана на четырех этапах обеспечения прослеживаемости качества и контроля при трансфере технологии [8]:

Идентификация и кодирование объекта разработки. При получении технического задания (ТЗ) на проведение НИОКР в цифровой контур вносится уникальный идентификатор, связанный с проектом государственного или частного заказчика. На этом этапе создается цифровой паспорт изделия и устанавливаются требования к качеству и параметры для контроля.

Регистрация и верификация результатов испытаний. По мере проведения испытаний (вузом и МИПом на своей экспериментальной базе) результаты заносятся в электронный журнал с указанием используемой методики, условий проведения испытаний и ответственного исполнителя. Все записи имеют электронную подпись исполнителя и подтверждение лица, ответственного за качество.

Передача пакета данных в систему менеджмента качества индустриального партнера. Шлюз интеграции автоматически конвертирует данные из цифрового паспорта в требуемый формат (с учетом специфики PDM/PLM-системы завода) и передает их в систему управления документами и качеством партнера. Соответствие стандартам гарантируется на уровне архитектуры без необходимости ручного переформатирования.

Обратная связь и управление изменениями. При выявлении дефектов или отклонений на стадии производства или эксплуатации данные поступают обратно в контур качества, анализируются специалистами, и результаты анализа используются для совершенствования регламентов и процедур вузовской СМК при подготовке будущих разработок.

Ожидаемые эффекты от внедрения модели цифрового контура качества

Внедрение предложенной архитектуры может обеспечить значительные преимущества для сокращения времени и затрат при трансфере технологий [6, 9]. Однако реальные эффекты будут зависеть от ряда факторов, включая готовность участников экосистемы к цифровизации, объем инвестиций в развитие платформы и способность органов управления гармонизировать процессы управления качеством.

Практические ограничения реализации. Основное препятствие состоит в различии требований заказчиков. Государственные заказчики часто имеют собственные требования к хранению конфиденциальной информации и могут ограничить использование облачных решений. Кроме того, малые инновационные предприятия оказываются не готовы к необходимым инвестициям в цифровую инфраструктуру. Длительный период окупаемости таких систем создает финансовые барьеры для МИПов с ограниченными бюджетами.

Повышение надежности передачи информации. При передаче конструкторской документации и протоколов испытаний от вуза к промышленному партнеру нередко происходят потери информации или несовпадения в интерпретации данных. Часто актуальные версии нормативных документов различаются между организациями. Механизм единой, актуализируемой базы нормативно-справочной информации исключил бы эту проблему, но требует постоянного администрирования и синхронизации с источниками актуальных данных.

Снижение затрат на администрирование качества. Текущая практика требует ручного переоформления результатов испытаний: инженеры вручную заполняют протоколы, переносят данные в системы управления, согласовывают версии документов. При переводе на полностью электронный до-

кументооборот с использованием единого идентификатора изделия и сквозной записи испытаний эти трудозатраты могут быть значительно снижены. Однако потребуются инвестиции в разработку интеграционных шлюзов и обучение персонала.

Сокращение сроков коммерциализации. В текущей практике значительное время затрачивается на согласование форматов технической документации, повторное тестирование в условиях производства и корректировку конструкторской документации под требования промышленного партнера. Внедрение единой системы документирования и автоматического конвертирования форматов может сократить эту фазу за счет исключения этапов пересоставления документов и дублирования испытаний. Однако это требует предварительной настройки шлюза интеграции под специфику каждого конкретного партнера.

На основе анализа практики взаимодействия РГАТУ с предприятиями авиадвигателестроительного сектора можно выделить потенциальные преимущества от внедрения предложенной архитектуры.

Повышение уровня взаимного доверия между участниками обеспечивается внедрением механизмов электронной подписи, сквозной прослеживаемости операций и формализацией всех процессов. Одновременно требуется разработать чёткие процедуры разрешения конфликтов и закрепить ответственность за достоверность данных на каждом уровне взаимодействия. Сформированная цифровая экосистема создаёт основу для ускоренной адаптации вузовских разработок к требованиям промышленности. Однако успешное внедрение зависит от готовности индустриальных партнёров к трансформации сложившихся практик сотрудничества с вузами, а также от системной государственной поддержки технологического развития.

Проведенный анализ взаимодействия вузов, малых инновационных предприятий и промышленных производителей выявил критические препятствия в цикле коммерциализации. Несогласованность требований к качеству и отсутствие единой информационной среды приводят к удлинению сроков и потере информации на этапах трансфера, что негативно влияет на инновационный потенциал [1, 2].

Предложенная архитектура цифрового контура представляет системное решение, позволяющее преодолеть названные препятствия путем введения единых стандартов, автоматизации конвертации информации и создания механизмов обратной связи [7, 8]. Отличие от существующих подходов заключается в переосмыслении организационных процессов управления качеством в контексте цифровизации.

Анализ показывает, что применение архитектуры может привести к сокращению сроков коммерциализации на 20–30% и снижению затрат на 15–25%. Эти показатели являются ориентировочными и будут варьироваться в зависимости от типа технологии, компетентности участников и уровня их технологической зрелости.

Реализация потребует координированных усилий на нескольких уровнях: на уровне организаций – адаптация внутренних процессов и переподготовка персонала; на уровне экосистемы – разработка согласованных регламентов; на уровне государства – создание благоприятного климата для инноваций. Рекомендуется инициировать пилотный проект на базе конкретного кластера (авиадвигателестроение), где уже имеется опыт взаимодействия участников.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М. : Стандартинформ, 2015. – 56 с.
2. ГОСТ РВ 0015-002-2020, Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2020, – 104 с.
3. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам создания бюджетными научными и образовательными учреждениями хозяйственных обществ : федер. закон от 02.08.2009 № 217-ФЗ (ред. от 27.12.2023) // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2009. – № 32. – Ст. 3988.
4. Об утверждении Концепции развития технологии до 2030 года : распоряжение Правительства Рос. Федерации от 20,05.2023 № 1315-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2023. – № 21. – Ст. 3456.
5. Индикаторы науки-2025 : статистический сборник / Л. М. Гохберг, И. А. Кузнецова, Е. П. Назарова [и др.]. – М. : НИУ ВШЭ, 2025. – 320 с.
6. Бахтизин Р. З., Шумилин В. Н. Цифровизация управления качеством в промышленности: методы, инструменты и результаты внедрения // Стандарты и качество. – 2024. – № 3. – С. 28–35.
7. Кулагин Н. П., Худов Р. В. Архитектура систем управления данными о продукте в PDM/PLM-решениях и интеграция с корпоративными системами // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2023. – № 10, – С. 45–52.
8. Никифоров А. А., Титов В. И. Процессный подход к проектированию систем менеджмента качества: методология IDEF0 и современные инструменты моделирования. – СПб. : Питер, 2022. – 384 с.
9. Соломахин А. Л., Кузьмин В. В. Трансфер технологий из высших учебных заведений: опыт системных решений и цифровых платформ // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2024. – № 5. – С. 72–81.
10. Моисеев А. В., Хромова О. А., Петров И. С. Управление несоответствиями в системах менеджмента качества оборонно-промышленных предприятий при трансфере технологий // Ученые записки РГАТУ. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 156–163.
11. Крашанин А. В., Борзова О. В. Правовые аспекты деятельности малых инновационных предприятий при вузах и механизмы их взаимодействия с промышленностью // Юридический журнал. – 2024. – № 2. – С. 34–42.
12. Козлов А. Я., Максимцев И. А. Облачные технологии в системах управления качеством и документооборотом промышленных предприятий // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 1. – С. 12–19.
13. Ярославцев О. В., Сергеева М. В., Орлова Е. В. Цифровые экосистемы для поддержки инноваций в авиадвигателестроении // Вестник РГАТУ им. П. А. Соловьёва. – 2024. – № 1. – С. 45–52.

Рудницкий С.Б.
д.т.н., профессор кафедры бизнес-информатики и менеджмента
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
sbr@spiiras.ru
Понамарев И.В.
студент
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
ponamarev_iv@mail.ru

МОДЕЛЬ ПОЭТАПНОГО СНИЖЕНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРАКТИК УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения эффективности управления качеством программных систем в условиях ограниченных ресурсов разработки. Предлагается модель оценки целесообразности внедрения практик контроля качества, основанная на сопоставлении их влияния на снижение дефектности и трудозатрат. В рамках модели процесс обеспечения качества представлен как последовательное внедрение механизмов контроля, каждый из которых направлен на выявление определённого класса дефектов. Показано, что различные практики обладают неоднородной эффективностью и характеризуются эффектом убывающей отдачи при увеличении затрат. Особое внимание уделяется разграничению проактивного и реактивного контуров контроля качества, а также определению минимально достижимого уровня дефектности, обусловленного факторами, плохо поддающимися автоматизации. На основе предложенного подхода сформирован сравнительный анализ практик контроля качества и продемонстрирована динамика изменения доли дефектов при их поэтапном внедрении. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования приоритетов внедрения практик тестирования и оптимизации процессов разработки. Особое внимание уделяется применимости модели в условиях автоматизации процессов разработки, где управление качеством интегрируется в автоматизированные конвейеры (CI/CD) и основывается на анализе данных о функционировании системы.

Ключевые слова: управление качеством, тестирование программного обеспечения, дефектность, эффективность тестирования, технический долг, автоматизация тестирования.

Rudnitskiy S.B.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department o
f Business Informatics and Management
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Russia, Saint Petersburg
sbr@spiiras.ru
Ponamarev I.V.
Student
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Russia, Saint Petersburg
ponamarev_iv@mail.ru

MODEL OF STEPWISE DEFECT REDUCTION IN SOFTWARE SYSTEMS BASED ON QUALITY MANAGEMENT PRACTICES

Abstract. The paper addresses the problem of improving the efficiency of software quality management under conditions of limited development resources. A model for evaluating the feasibility of implementing quality assurance practices is proposed, based on comparing their impact on defect reduction and development effort. Within the proposed model, the quality assurance process is represented as a sequential implementation of control mechanisms, each aimed at detecting a specific class of defects. It is shown that different practices demonstrate heterogeneous effectiveness and are characterized by diminishing returns as costs increase. Particular attention is paid to distinguishing between proactive and reactive quality control loops, as well as to defining the minimum achievable level of defects caused by factors that are poorly amenable to automation. Based on the proposed approach, a comparative analysis of quality assurance practices is presented, and the dynamics of defect rate reduction during their phased implementation are demonstrated. The obtained results can be used to justify the prioritization of testing practices and to optimize software development processes. Special attention is given to the applicability of the model in the context of automation of development processes, where quality management is integrated into automated CI/CD pipelines and relies on data-driven analysis of system behavior.

Keywords: quality management, software testing, defect rate, testing effectiveness, technical debt, test automation.

Актуальность проблемы обусловлена высокой стоимостью сопровождения существующих веб-систем при ограниченных ресурсах разработки и необходимостью управления техническим долгом. В современных девелоперских компаниях значительная часть информационных систем является исторически сложившейся и поддерживает критически важные бизнес-процессы. Полная замена таких систем зачастую невозможна, при этом их сопровождение требует усилий, сопоставимых с разработкой новой функциональности. Неуправляемый технический долг увеличивает расходы на сопровождение, снижает скорость внедрения изменений и ограничивает финансовую эффективность проектов [1]. Это снижает адаптивность компаний в условиях динамического рынка и подчеркивает необходимость применения моделей управления техническим долгом.

Сложность сопровождения усугубляется высокой изменчивостью требований и недостаточной формализацией бизнес-логики – «аналитической запутанностью». Она приводит к накоплению технического долга: разработчики вынуждены внедрять временные решения и архитектурные компромиссы [2, с. 1215]. В результате растут затраты на исправление ошибок и развитие системы, снижается скорость изменений и финансовая эффективность проектов. В таких условиях традиционные подходы к обеспечению качества, ориентированные на максимальное покрытие и предрелизное тестирование, оказываются недостаточно эффективными [3, с. 360].

При этом достижение полного отсутствия дефектов в программных системах невозможно. Исчерпывающее тестирование неосуществимо вслед-

ствие огромного пространства входных данных и состояний системы, а тестирование способно выявлять ошибки, но не доказывать их отсутствие [4, с. 44]. Таким образом, часть дефектов неизбежно остаётся необнаруженной, а попытки полного покрытия требуют несоразмерных затрат ресурсов.

Для решения указанных проблем предлагается адаптивный к характеристикам программной системы контур управления качеством, учитывающий технический долг и уровень аналитической запутанности системы. Подход включает статическую типизацию, автоматизированное тестирование API и мониторинг метрик качества системы, обеспечивая поэтапное внедрение контроля с приоритизацией критических участков. В условиях автоматизации разработки управление качеством становится частью конвейеров CI/CD, что требует принятия решений о внедрении практик на основе данных и позволяет использовать предложенную модель для обоснования их выбора. Подход обеспечивает снижение затрат, минимизацию рисков и поддержание высокой скорости разработки.

Предлагается модель адаптивного управления качеством веб-систем, ориентированная на снижение дефектности в условиях высокой изменчивости требований и ограниченных ресурсов разработки. Подход основан на принципе проактивного управления качеством, предполагающего выявление и устранение дефектов на ранних этапах жизненного цикла программного обеспечения.

Модель рассматривает процесс обеспечения качества как двухконтурную систему, включающую проактивный и реактивный контуры. Проактивный контур направлен на предупреждение возникновения дефектов в процессе разработки, тогда как реактивный контур обеспечивает мониторинг системы в условиях эксплуатации и формирует обратную связь.

Ключевой особенностью модели является поэтапное наращивание уровня контроля качества с приоритизацией наиболее эффективных практик. В отличие от экстенсивного подхода, ориентированного на максимальное покрытие тестами, предлагаемый подход основан на выборе инструментов с учётом их влияния на снижение дефектности и требуемых затрат.

Снижение дефектности достигается последовательным внедрением различных механизмов контроля:

где D_t – доля дефектов после релиза, определяемая как отношение количества задач, связанных с исправлением дефектов, к общему объему задач разработки, D_{min} – минимально достижимый уровень дефектности, обусловленный внешними условиями эксплуатации, D_0 – исходный уровень дефектности, β_i – доля дефектов, устраняемых i-м механизмом контроля.

Данная зависимость отражает мультипликативный характер снижения дефектности и объясняет эффект убывающей отдачи: по мере внедрения новых практик каждая последующая устраняет всё меньшую долю оставшихся дефектов. Таким образом, даже при значительном увеличении объёма тестирования достигается лишь асимптотическое приближение к минимально достижимому уровню дефектности D_{min}.

Дополнительно учитывается, что процесс разработки является источником новых дефектов. Внесение изменений в кодовую базу сопровождается вероятностью появления ошибок, что приводит к постоянному появлению новых дефектов и ограничивает скорость снижения их доли.

Проактивный контур реализуется в виде многоуровневой системы контроля качества, включающей статическую верификацию, быстрые проверки, модульное, интеграционное и регрессионное тестирование. Под быстрыми проверками понимаются автоматизированные проверки базовой работоспособности системы, включая смоук-тестирование и контрактное тестирование API. Базовые механизмы устраняют значительную долю дефектов при минимальных затратах, тогда как более сложные виды тестирования требуют больших ресурсов.

Реактивный контур представлен системой эксплуатационного мониторинга, обеспечивающей сбор данных о поведении системы. Он реализуется с использованием цифровых инструментов анализа, включая системы сбора ошибок и эксплуатационных метрик. В отличие от проактивных механизмов, контур не снижает дефектность напрямую, а выполняет функцию обратной связи: выявляет аномалии, поддерживает анализ инцидентов и формирование приоритетов доработок. Его наличие отражает существование минимально достижимого уровня дефектности D_{min}, поскольку часть дефектов проявляется только в процессе эксплуатации.

Практики контроля качества рассматриваются как последовательно внедряемые механизмы, каждый из которых вносит вклад в снижение дефектности системы. При этом по мере роста трудозатрат наблюдается снижение относительной эффективности: базовые практики обеспечивают наибольший эффект при минимальных затратах, тогда как более сложные методы дают меньший прирост качества при существенно больших ресурсах. Это соответствует эффекту убывающей отдачи от расширения набора применяемых практик.

Таким образом, предложенная модель объединяет проактивные и реактивные механизмы управления качеством, а также формализует процесс поэтапного снижения дефектности. Это позволяет обосновать последовательность внедрения практик контроля качества с учётом их относительной эффективности и особенностей программной системы.

Адаптивность контура управления качеством реализуется через итеративный процесс принятия решений о внедрении практик. На каждом этапе учитывается текущий уровень дефектности системы и наблюдаемая динамика её изменения. Внедрение новых механизмов контроля осуществляется до тех пор, пока достигается значимое снижение дефектности; при приближении к минимально достижимому уровню дальнейшее расширение набора практик требует более точечного и обоснованного применения.

В рамках предложенной модели все дефекты рассматриваются как равнозначные, тогда как в реальных условиях их влияние определяется степенью критичности. Перспективным направлением развития модели является

введение весовых коэффициентов серьёзности дефектов, позволяющих учитывать различия в их влиянии на систему и бизнес-процессы.

Оценка предложенной модели проводилась на основе анализа динамики доли дефектов после релиза D_t в процессе поэтапного внедрения механизмов контроля качества в промышленной среде разработки.

Для иллюстрации влияния поэтапного внедрения механизмов контроля качества на динамику дефектности был проведён анализ изменений доли исправлений после релиза в различные периоды разработки, отражающий последовательное расширение применяемых практик. При этом каждый этап характеризуется внедрением дополнительных инструментов и процедур контроля качества, что позволяет оценить их совокупное влияние на результат. Результаты анализа представлены в таблице.

Таблица

Динамика доли исправлений после публикации

Период	Механизм контроля	Численность разработчиков	Доля исправлений,%
I полугодие 2023 г.	без контура	4	42.86
II полугодие 2023 г.	статическая типизация	4	33.87
I полугодие 2024 г.	контрактное тестирование API	3	25.11
II полугодие 2024 г.	регрессионные тесты	4	18.37
I полугодие 2025 г.	расширение покрытия	6	16.57
II полугодие 2025 г.	стабилизация	6	17.43

Наблюдаемая динамика показателя Dt, отражающего долю исправлений после релиза, согласуется с предложенной моделью поэтапного снижения дефектности. Наибольшее снижение достигается на ранних этапах внедрения базовых механизмов, тогда как последующее расширение тестирования обеспечивает меньший прирост качества при увеличении трудозатрат.

Анализ данных таблицы показывает, что на ранних этапах внедрения механизмов контроля достигается максимальное снижение дефектности. В частности, внедрение статической типизации во второй половине 2023 года позволило снизить долю дефектов с 42.86% до 33.87%, а реализация контрактного тестирования API в первой половине 2024 года – до 25.11%.

В последующие периоды наблюдается замедление темпов снижения дефектности и стабилизация показателя на уровне 16–17%, несмотря на рост численности команды до 6 разработчиков. Это соответствует эффекту убывающей отдачи: каждый последующий механизм контроля применяется к уже уменьшенному множеству оставшихся дефектов, что ограничивает его дополнительное влияние на снижение D_t. При этом следует учитывать, что

наблюдаемая динамика формировалась в условиях изменения организационных параметров разработки, включая численность команды, её стабильность и накопленный опыт. В связи с этим полученные результаты не позволяют полностью изолировать влияние внедрённых практик контроля качества от сопутствующих факторов. Тем не менее наблюдаемая устойчивая тенденция снижения дефектности при последовательном расширении механизмов контроля согласуется с теоретической моделью и подтверждает её прикладную состоятельность.

При этом в II полугодии 2025 года наблюдается незначительный рост доли дефектов с 16.57% до 17.43%. Данное отклонение может рассматриваться как статистическое колебание показателя, обусловленное вариативностью процесса разработки и ограниченным объёмом наблюдений. В условиях, близких к минимально достижимому уровню дефектности, подобные колебания показателя являются ожидаемыми и не противоречат общей тенденции.

Полученные результаты согласуются с предложенной моделью поэтапного снижения дефектности. На ранних этапах внедрения достигается наибольшее снижение дефектности при относительно низких трудозатратах. По мере расширения набора практик контроль становится более ресурсоёмким, однако его вклад в снижение дефектности уменьшается, что подтверждает эффект убывающей отдачи и ограниченную целесообразность экстенсивного увеличения покрытия.

Дополнительный анализ показывает, что оставшиеся дефекты имеют разнородную природу. Значительная часть связана с факторами, плохо поддающимися автоматизации, включая неполноту или изменчивость требований, особенности взаимодействия со сторонними сервисами и инфраструктурные ограничения. Это соответствует наличию компоненты Dmin, определяющей нижнюю границу достижимого уровня качества. Представляется, что структура остаточных дефектов определяется совокупностью указанных факторов; их детальная количественная декомпозиция требует отдельного исследования и в рамках данной работы не проводилась.

Таким образом, результаты исследования показывают, что поэтапное внедрение механизмов контроля качества, ориентированных на различные классы дефектов, позволяет снизить долю дефектов после релиза при рациональном увеличении трудозатрат. Дальнейшее снижение носит асимптотический характер и требует точечного применения более ресурсоёмких практик, таких как *end-to-end* и поведенческое тестирование.

Список литературы

1. Пудовкина О. Е., Хорина И. В., Бражников М. А. Финансовая модель управления техническим долгом в IT-проектах в контексте парадигмы цифрового развития // Фундаментальные исследования. 2024. № 12. С. 69–75. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=43742 (дата обращения: 21.03.2026). DOI: 10,17513/fr.43742.

2. Яковенко М. С., Савенкова Т. Э., Лысенко А. С. Технический долг в корпоративных программных системах: причины, последствия и методы управления // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2025): сб. докл. Нац. науч.-техн. конф. с междунар. участием. Москва, 07–12 апреля 2025 г. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2025.

3. Гамков Д. М. Применение методологии TDD при разработке программного обеспечения для космических аппаратов // Экстремальная робототехника. 2024. № 1(34).

4. Кейнер К., Бах Дж., Петтикорд Б. Тестирование программного обеспечения: контекстно-ориентированный подход. СПб.: Питер, 2025. 352 с.

5. Beyazit M., Tuglular T., Kaya D. O. Incremental testing in software product lines – an event-based approach // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 2384–2395. DOI: 10,1109/ACCESS.2023.3234186.

6. Fowler M. The Practical Test Pyramid [Электронный ресурс]. URL: https://martinfowler.com/articles/practical-test-pyramid.html (дата обращения: 05.04.2026).

7. Vanoverberghe D., De Halleux J., Tillmann N., Piessens F. State coverage: software validation metrics beyond code coverage // SOFSEM 2012: Theory and Practice of Computer Science. Berlin; Heidelberg: Springer, 2012. P. 544–555. DOI: 10,1007/978-3-642-27660-6_44.

8. Rothermel G., Harrold M. J. A safe, efficient regression test selection technique // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 1997. Vol. 6, № 2. P. 173–210, DOI: 10,1145/248233.248262.

9. Elbaum S., Malishevsky A., Rothermel G. Regression test selection for Java software // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. 2002. Vol. 27, № 6. P. 110–113. DOI: 10,1145/605466.605485.

Елизарова Н.Ю.
к.э.н., доцент кафедры «Динамики процессов и управления»
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
enu1604@mail.ru
Викторов М.С.
студент
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
ViktorovMS@stud.kai.ru

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К УЧЕТУ ЗАТРАТ В ОРГАНИЗАЦИЯХ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается учет затрат в организациях жилищно-коммунального обслуживания с позиции объектной аналитики. В действующей учетной практике расходы чаще связываются с договором, счетом, статьей затрат или контрагентом. Объект обслуживания при этом может фиксироваться неполно: например, в комментарии к документу, во внешней таблице или в пояснениях ответственного сотрудника. Для регламентированного учета такой записи иногда достаточно, но для управленческого анализа

она создает разрыв между хозяйственной операцией и местом возникновения затрат. Экономисту и руководителю важно видеть, к какому дому, подъезду, помещению или участку относится расход, по какому виду работ он возник и как влияет на себестоимость обслуживания. В статье обоснован объектно-ориентированный подход, при котором объект обслуживания закрепляется как самостоятельный аналитический признак уже при вводе первичного документа. Это позволяет связать затраты, договоры, виды работ, подрядчиков, оплаты и задолженность в единой учетной записи. Отдельно раскрыто отличие объекта жилищно-коммунального обслуживания от строительного объекта: дом или участок обслуживается регулярно, поэтому учет должен сохранять историю расходов за несколько периодов, а не ограничиваться закрытием отдельного заказа. Предложены основные аналитические разрезы учетной подсистемы: объект обслуживания, договор, статья затрат, вид работ, контрагент, первичный документ и состояние расчетов. Практическая значимость подхода заключается в повышении точности распределения расходов, сокращении ручных сверок и подготовке управленческой отчетности по каждому объекту обслуживания.

Ключевые слова: объект обслуживания, жилищно-коммунальное хозяйство, учет затрат, себестоимость, подрядчики, накладные расходы, управленческая отчетность.

Elizarova N.Yu.
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
of the Department of Dynamics and Management
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
enu1604@mail.ru
Viktorov M.S.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
ViktorovMS@stud.kai.ru

OBJECT-ORIENTED APPROACH TO COST ACCOUNTING IN HOUSING AND COMMUNAL SERVICE ORGANIZATIONS

Abstract. The article examines cost accounting in housing and communal service organizations from the perspective of object-based analytics. In current accounting practice, expenses are usually linked to a contract, invoice, cost item or counterparty. The serviced facility may be recorded incompletely: for example, in a document comment, in an external spreadsheet or in explanations provided by the responsible employee. Such a record may be sufficient for regulated accounting, but it creates a gap between the business transaction and the place where the cost actually arises. An economist or manager needs to see which building, entrance, room or service area the expense relates to, what type of work caused it and how it affects the cost of servicing the facility. The article substantiates an object-oriented approach in which the serviced facility is recorded as an independent analytical attribute when the primary document is entered. This makes it possible to link costs, contracts, types of work, contractors, payments and debts within a single accounting entry. The article separately explains the difference between a housing and communal service object and a construction object: a building or service area is maintained regularly, so accounting should keep the cost history for several periods rather than be limited to closing a single order. The main analytical dimensions of the accounting subsystem are proposed: serviced facility, contract, cost item, type of work, counterparty, primary document and settlement status. The practical value of the approach lies in more accurate cost allocation, fewer manual reconciliations and preparation of management reports for each serviced facility

Keywords: serviced facility, housing and communal services, cost accounting, cost price, contractors, overhead costs, management reporting.

В жилищно-коммунальном обслуживании каждая хозяйственная операция связана с конкретным объектом: домом, подъездом, помещением, инженерной сетью или участком обслуживания. С этим объектом связаны списание материалов, услуги подрядчиков, работы собственного подразделения, транспортные расходы и распределяемая часть накладных затрат. Если объект указывается только в комментарии к документу или во внешней таблице, учетная информация теряет аналитическую ценность. При подготовке отчета приходится дополнительно сопоставлять договоры, акты, счета, заявки и внутренние пояснения сотрудников.

Для капитального строительства привычен учет по заказу или договору подряда. Такая схема удобна, когда объект строительства один, работы имеют проектно-сметную основу, а результат передается заказчику по этапам. Организации жилищно-коммунального обслуживания работают в другом режиме. Они ведут десятки и сотни объектов одновременно, выполняют повторяющиеся работы, совмещают плановое содержание с аварийными заявками, используют собственные подразделения и подрядчиков. Объект учета здесь мельче классического строительного объекта, но именно он нужен руководителю участка и экономисту.

В публикациях по строительному учету раскрываются вопросы формирования себестоимости работ, применения позаказного метода, распределения накладных расходов, учета вспомогательных производств и организации управленческого учета. Зимакова, Коваленко и Визницкая предлагают рассматривать производственный учет как подсистему, где связаны планирование, учет производственных процессов и контроль [1]. Серебрякова указывает на проблемы применения инструментов управленческого учета в строительных организациях: слабую детализацию, недостаточный контроль отклонений, разрыв между планированием и фактическим учетом [2]. Эти выводы хорошо применимы к сфере обслуживания жилищного фонда, но требуют уточнения: объектом анализа должен стать не только договор, а обслуживаемый объект.

Цель статьи связана с проверкой следующего положения: в жилищно-коммунальном обслуживании договор не всегда может служить главным разрезом учета затрат. Договор показывает юридическое основание работ, но не всегда отвечает на управленческий вопрос: где именно возник расход и на какой объект его отнести. Поэтому в статье уточняется, в каких ситуациях договорная аналитика теряет детализацию, какие реквизиты нужно закреплять в первичном документе, как разделять расходы прямого отнесения и распределяемые суммы, а также какие показатели получает управленческий учет при переходе к объектной модели.

Методическая основа работы сформирована через сопоставление двух предметных областей. Первая связана с исследованиями по учету затрат в

строительных организациях: калькулирование себестоимости, распределение накладных расходов, учетная политика, расчеты с подрядчиками. Вторая относится к практике жилищно-коммунального обслуживания, где объект учета устроен иначе. Здесь расход может быть связан с договором, заявкой, видом работ и конкретным домом одновременно. Поэтому положения строительного учета использованы не напрямую, а с учетом ремонтно-эксплуатационной специфики.

Первый шаг методологии – выделение положений, которые можно перенести из строительного учета без существенных изменений. К ним относятся позаказный принцип накопления прямых затрат, раздельный учет по статьям калькуляции, контроль фактических расходов и необходимость распределять накладные расходы по выбранной базе. Семенова и Аджиева показывают, что в строительстве позаказный метод часто используется как основной метод калькулирования, а для повышения точности может дополняться АВС-подходом [3]. Штанговец также сравнивает основные методы учета затрат и отмечает значение позаказного и нормативного подходов для строительной отрасли [4].

Второй шаг – отделение тех положений, которые требуют адаптации. Для жилищного фонда схема «один заказ – один объект» работает не всегда. Один заказ может охватывать несколько домов. Один дом, напротив, может обслуживаться по разным договорам: содержание, текущий ремонт, аварийные работы, отдельные дополнительные заявки. Из-за этого учет только по договору дает неполную картину затрат. Объект обслуживания нужно фиксировать отдельно, иначе себестоимость дома или участка приходится восстанавливать после отражения операции, по документам и пояснениям сотрудников. По одному объекту в течение месяца проходят разные документы: требование-накладная, акт подрядчика, счет, платеж, внутренний наряд, ведомость распределения. Поэтому для такой организации договор не должен быть единственной осью учета.

Третий шаг – формирование набора аналитических признаков. В научных источниках часто рассматриваются объект строительства, заказ, вид работ, статья затрат, подразделение, центр ответственности и подрядчик [5; 6]. Для жилищно-коммунального обслуживания этот набор целесообразно дополнить объектом обслуживания. Под ним понимается дом, подъезд, помещение, участок, инженерная система или иной элемент жилищного фонда, по которому организация хочет видеть затраты и результат.

Методология также включает логическое моделирование учетной записи. Проверялось, какие сведения должны попасть в запись сразу при вводе первичного документа, чтобы отчетность не собиралась вручную после закрытия периода. Такой подход ближе к практической задаче разработки информационной подсистемы: система должна не хранить примечания к операциям, а формировать аналитические данные в момент их возникновения.

Анализ литературы и предметной области показывает: для организаций жилищно-коммунального обслуживания объектно-ориентированный учет не сводится к дополнительному справочнику. Это способ построить связь между хозяйственной операцией и местом, где возник экономический смысл этой операции. Если акт подрядчика принят по ремонту входной группы дома, объект должен быть указан в документе. Если со склада списаны материалы на аварийную заявку, объект тоже должен быть указан. Если расходы относятся сразу к нескольким домам, система должна распределить их по понятной базе.

Классический учет по договору дает юридическую привязку, но не всегда дает управленческую картину. Договор может охватывать группу домов. Один дом может иметь несколько направлений работ: содержание, текущий ремонт, капитальные мероприятия, аварийные заявки. Договор показывает обязательство, объект показывает место возникновения затрат. Для финансового контроля нужны оба признака. Отказ от одного из них приводит к перекосу: учет становится либо юридически аккуратным, но слабым для анализа, либо удобным для внутренних таблиц, но плохо связанным с первичными документами.

Таблица 1

Различия между договорной и объектной логикой учета

Критерий	Учет только по договору	Объектно-ориентированный учет
Основной вопрос	С каким обязательством связана операция	На каких объектах возникли затраты
Единица анализа	Договор, заказ, контрагент	Дом, подъезд, помещение, участок, инженерная система
Проблема при большом числе объектов	Затраты внутри договора смешиваются	Можно увидеть расходы по каждому объекту
Связь с управлением	Удобно для расчетов и документов	Удобно для контроля себестоимости и сравнения объектов
Типовая ошибка	Объект указывается в комментарии или таблице	Объект фиксируется как обязательная аналитика

Объектная модель особенно заметна в работе с прямыми затратами. Материалы, заработная плата участка, услуги подрядчика и транспортные расходы можно связать с конкретным домом или видом работ. Ткаченко указывает, что учет затрат в строительстве должен давать достоверную информацию о реальной величине затрат по видам и объектам работ, а также помогать контролировать использование ресурсов [5]. Для жилищно-коммунального обслуживания эта мысль сохраняется, но объектом становятся не только строящиеся здания. Им может быть уже эксплуатируемый дом, зона обслуживания или группа помещений.

С косвенными расходами ситуация сложнее. Ветрова показывает, что вспомогательные производства требуют детального аналитического учета, иначе себестоимость искажается [7]. Пиксайкина рассматривает накладные

расходы строительства и связывает их учет с выбором состава статей и базы распределения [8]. В сфере обслуживания жилищного фонда косвенные расходы возникают постоянно: транспорт обслуживает несколько адресов, склад выдает материалы общего назначения, административные расходы поддерживают работу всех объектов, диспетчерская обрабатывает заявки по разным домам. Если эти суммы списывать общим блоком, отчет по дому будет неполным.

Объектно-ориентированный подход требует закрепить базу распределения заранее. Для одних расходов подходит площадь обслуживаемых помещений, для других – сумма прямых затрат, количество заявок, часы работы, число обслуживаемых квартир или период обслуживания. Универсальной базы нет. Более того, попытка использовать одну базу для всех расходов обычно дает красивую таблицу и слабую экономику. Транспорт логичнее распределять по рейсам или времени работы, диспетчеризацию – по заявкам, общехозяйственные расходы – по выбранному нормативу. В учетной политике и настройках системы эти правила должны быть записаны без двусмысленности.

Отдельного уточнения требует момент появления информации в учете. В бухгалтерском учете операция часто отражается после поступления закрывающих документов: акта, счета, накладной или иного подтверждения. В управленческом учете информация нужна раньше, в момент фактического выполнения работ, передачи материалов, оказания услуги или оплаты подрядчику. Поэтому объектная аналитика должна фиксироваться не только при бухгалтерском отражении документа, но и на стадии управленческой регистрации операции. Такой подход позволяет заранее видеть ожидаемые расходы по дому или участку, а после получения закрывающих документов сверять управленческие данные с бухгалтерскими. При этом требование к документальному подтверждению не снимается: для контроля важно, чтобы первичные документы поступали своевременно и содержали корректные реквизиты.

Взаиморасчеты с подрядчиками тоже должны подчиняться объектной логике. Зулкарнаева отмечает, что в строительстве важны расчеты с поставщиками и подрядчиками, а подрядный способ выступает распространенной организационной формой выполнения работ [9]. Для жилищно-коммунального обслуживания расчет с подрядчиком интересен не только в целом по контрагенту. Руководителю нужно понимать, по каким домам приняты акты, какие работы оплачены, где осталась задолженность, какие суммы спорные при сверке. Без привязки к объекту акт сверки отвечает на вопрос о долге перед подрядчиком, но не объясняет, какой объект этот долг сформировал.

На уровне информационной подсистемы это означает, что учетная запись должна содержать устойчивый набор аналитических признаков. Минимальный состав приведен в таблице 2. Он не закрывает все возможные

варианты, но задает каркас, без которого объектная отчетность обычно распадается на внешние файлы.

Таблица 2

Аналитические признаки учетной записи при объектно-ориентированном подходе

Признак	Что фиксирует	Зачем нужен
Объект обслуживания	Дом, подъезд, помещение, участок, инженерная система	Расчет затрат и результата по месту возникновения работ
Договор	Основание обслуживания или выполнения работ	Связь затрат с обязательствами и условиями расчетов
Вид работ	Содержание, ремонт, аварийные работы, дополнительные услуги	Разделение регулярных и разовых затрат
Статья затрат	Материалы, подрядчики, транспорт, оплата труда, накладные расходы	Калькулирование себестоимости и анализ структуры расходов
Контрагент или подразделение	Подрядчик, поставщик, внутренний участок	Контроль расчетов и ответственности за операцию
Первичный документ	Акт, счет, накладная, наряд, платежный документ	Прослеживаемость операции от отчета к основанию
База распределения	Площадь, прямые затраты, заявки, часы, норматив	Перенос общих расходов на объекты по выбранному правилу

Предложенная логика меняет состав отчетности. В обычной схеме отчет по затратам отвечает на вопрос, сколько потрачено по статье или счету учета. Объектная схема добавляет другой вопрос: где именно возникла эта сумма и чем она подтверждена. Для бухгалтера это способ быстро проверить документ. Для экономиста – база для план-факт анализа. Для мастера – подтверждение расхода материалов и работ по дому. Для руководителя – сравнение объектов между собой.

Практический эффект проявляется в трех зонах. Первая зона – точность себестоимости. Когда прямые расходы сразу попадают на объект, а косвенные распределяются по утвержденным правилам, результат по дому становится менее зависимым от ручных переносов. Вторая зона – скорость отчетности. Экономист не собирает данные из учетной системы, Excel и переписки, а получает отчет из одной базы. Третья зона – контроль расчетов. Задолженность перед подрядчиком можно рассмотреть не только по контрагенту, но и по объектам, где были выполнены работы.

У объектного подхода есть ограничения. Он требует дисциплины ввода данных. Если мастер не указывает объект, а бухгалтер принимает документ без проверки аналитики, модель быстро превращается в формальность. Требуется единая нормативно-справочная информация: список объектов, договоров, видов работ, статей затрат, контрагентов и подразделений. Азиева и Фильченко подчеркивают роль учетной политики как внутреннего регламента, который задает варианты учета и влияет на учетный процесс строительной организации [10]. Для жилищно-коммунального обслуживания этот регламент должен описывать не только счета учета, но и правила объектной аналитики.

Есть и организационная трудность. Бухгалтерия обычно отвечает за корректность документов, инженеры и мастера – за фактическое выполнение работ, экономист – за анализ. Объектная модель заставляет эти роли работать с одними данными. Это не всегда удобно на старте. Зато именно такая связка убирает распространенную ситуацию, когда бухгалтерский учет ведется в системе, расчеты проверяются в таблицах, а фактическая детализация по дому хранится в сообщениях и папках на диске.

Для автоматизации объектно-ориентированный подход означает, что справочник объектов обслуживания должен стать полноценным элементом учетной модели. Он связан с договорами, адресами, участками, ответственными лицами и видами работ. Документы движения затрат должны иметь обязательное поле объекта либо механизм распределения по нескольким объектам. Отчеты должны строиться не только по счетам и статьям, но и по дому, договору, подрядчику, периоду, виду работ. Иначе система останется бухгалтерской базой с управленческими комментариями на полях. На рисунке показана укрупненная схема движения данных при объектно-ориентированном учете. В центре находится объект обслуживания. Вокруг него группируются документы, затраты, расчеты и отчеты. Смысл схемы простой: объект не добавляется к учету в конце периода, он участвует в операции с момента ее регистрации.



Рис. Объект обслуживания как центр аналитической модели учета

Схема важна еще по одной причине. Она показывает границу между простым учетом затрат и объектно-ориентированной моделью. В первом случае объект ищут после операции. Во втором случае операция не считается полной без объекта или правила распределения. Это дисциплинирует ввод данных и делает последующую аналитику более устойчивой.

В организациях жилищно-коммунального обслуживания такой подход позволяет решать задачу сравнительного анализа объектов. Например, два дома могут иметь одинаковую площадь, но разную структуру расходов из-

за состояния инженерных сетей, частоты аварийных заявок, состава подрядных работ или качества текущего содержания. Учет по договору покажет общую сумму. Учет по объекту покажет причину различия. Это разные уровни информации, необходимые для процесса принятия управленческих решений.

Еще один результат касается планирования. План затрат по дому можно связать с фактическими документами и отклонениями. Если текущий ремонт регулярно превышает план из-за аварийных работ, это сигнал не только для бухгалтерии. Это сигнал для технического блока: нужно пересмотреть состояние объекта, график профилактики или условия договора с подрядчиком. Финансовый показатель начинает работать как индикатор технической проблемы.

Объектно-ориентированный подход не отменяет бухгалтерский учет и не заменяет учетную политику. Он добавляет управленческую плоскость, которая строится на тех же первичных документах. Поэтому его ценность выше в тех организациях, где данные вводятся один раз и затем используются разными пользователями. Повторный ввод в таблицы должен стать исключением, а не обычной частью закрытия месяца.

Организации жилищно-коммунального обслуживания нуждаются в учете, который отражает место возникновения затрат. Для них объектом анализа становится не только договор или заказ, а конкретный дом, подъезд, помещение, участок или инженерная система. Такая детализация особенно важна при большом числе обслуживаемых объектов, регулярных работах, аварийных заявках и участии подрядчиков.

Объектно-ориентированный подход позволяет связать первичный документ, статью затрат, вид работ, договор, контрагента и объект обслуживания в одной учетной записи. Прямые расходы относятся на объект при вводе документа, косвенные распределяются по заранее закрепленной базе. В результате отчетность по объектам строится на учетных данных, а не на ручной сборке сведений из разных источников.

Главное условие работоспособности такой модели – дисциплина аналитического учета. Нужны единые справочники, понятные правила распределения, закрепление требований в учетной политике и участие пользователей, которые работают с объектами на практике. При этих условиях объектно-ориентированный учет повышает точность себестоимости, ускоряет подготовку внутренней отчетности и делает финансовый контроль ближе к реальному состоянию жилищного фонда.

Список литературы

1. Зимакова Л.А. Формирование подсистемы производственного учета в строительных организациях / Л.А. Зимакова, С.Н. Коваленко, Е.А. Визницкая // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2023. № 11–1. С. 42–52. DOI: 10,17513/vaael.3031.

2. Серебрякова А.И. Проблемы применения инструментов управленческого учета в строительных организациях // Учет, анализ, аудит: проблемы теории и практики. 2021. № 27. С. 167–173.

3. Семенова Ф.З. Отдельные аспекты учета затрат в строительных организациях / Ф.З. Семенова, А.Ш. Аджиева // Вестник науки и образования. 2017. Т. 1. № 5 (29). С. 30–35.

4. Штанговец Е.С. Проблемы применения методов учета затрат в строительстве // Учет, анализ и аудит: проблемы теории и практики. 2016. № 16. С. 132–136.

5. Ткаченко И.Ю. Особенности учета затрат на производство строительных работ // Раздел 1. Бухгалтерский учет: проблемы и их решения. 2010, С. 8–11.

6. Попова Е.Р. Классификация затрат по статьям калькуляции в бухгалтерском учете предприятий строительной отрасли // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2011. № 17 (59). С. 39–47.

7. Ветрова М.Н. Калькулирование себестоимости продукции вспомогательных производств в строительстве // Вестник АПК Ставрополья. 2011. № 3 (3). С. 69–72.

8. Пиксайкина Д.А. Особенности учета накладных расходов строительства // Вектор экономики. 2017. № 12.

9. Зулкарнаева А.Н. Методика бухгалтерского учета и отчетности в строительных организациях // Международный научный журнал «Синергия наук». 2020, № 54.

10. Азиева З.И. Особенности формирования учетной политики в строительных организациях / З.И. Азиева, Ю.В. Фильченко // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2018. С. 721–725.

11. Пономарева Н.И. Особенности формирования учетно-аналитической системы в строительных организациях // Успехи современного естествознания. 2008. № 7.

12. Кулова Э.У. Особенности строительного производства и их влияние на построение системы учета // Наука и новые технологии. 2011. № 10, С. 55–58.

Чуктурова А.К.
студент
Нижнекамский химико-технологический институт
Россия, Нижнекамск
arina.chukturova@yandex.ru
Фахрудтинова А.А.
ассистент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий
Нижнекамский химико-технологический институт
Россия, Нижнекамск
arinapyfik@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ

Аннотация. В работе рассматриваются основные способы повышения эффективности источников бесперебойного питания (ИБП). Особое внимание уделено выбору аккумуляторных технологий, алгоритмам управления зарядом и системам цифрового мониторинга. На основе анализа режимов работы, деградации накопителей энергии и нагрузки определены основные направления оптимизаций. Результаты исследования подтверждают экономическую и техническую обоснованность перехода к гибридным, модульным и интеллектуальным системам ИБП. В работе сформулированы рекомендации по алгоритмическому управлению и выбору химического состава АКБ.

Ключевые слова: источник бесперебойного питания, энергоэффективность, литий-ионные аккумуляторы, предиктивное обслуживание, цифровой мониторинг.

Chukturova A.K.
Student
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology
Russia, Nizhnekamsk
arina.chukturova@yandex.ru
Fakhrudtinova A.A.
Assistant of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology
Russia, Nizhnekamsk
arinapyfik@yandex.ru

OPTIMIZATION OF UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES OPERATION

Abstract. The paper discusses the main ways to improve the efficiency of uninterruptible power supplies (UPS). Special attention is paid to the selection of battery technologies, charge control algorithms, and digital monitoring systems. Based on the analysis of operating modes, degradation of energy storage devices, and load conditions, the main areas of optimization have been identified. The research results confirm the economic and technical feasibility of switching to hybrid, modular, and intelligent UPS systems. The paper provides recommendations for algorithmic control and the selection of battery chemistry.

Keywords: uninterruptible power supply, energy efficiency, lithium-ion batteries, predictive maintenance, digital monitoring.

Цифровизация промышленности, рост объёмов обработки данных и автоматизации производственных процессов делают бесперебойное электроснабжение критическим фактором устойчивости инфраструктуры. КПД падает при неполной нагрузке, а обслуживание часто сводится к плановой замене. В условиях роста трафиков на электроэнергию, ужесточения требований к отказоустойчивости и развития распределённой энергетики вопрос оптимизации ИБП становится не столько техническим, сколько экономическим.

Оценить техническую, экономическую и эксплуатационную эффективность современных источников бесперебойного питания, разработать комплексные методы оптимизации их работы, обслуживания и интеграции в распределенные энергосистемы.

Изучить технологические принципы работы ИБП и современные модификации накопителей энергии.

Проанализировать показатели эффективности и надёжности аккумуляторов в реальных условиях эксплуатации.

Выявить преимущество и ограничения традиционных и интеллектуальных решений ИБП.

Провести сравнительных анализ по стоимости владения, уровню потерь энергии и экологическому воздействию.

Сформулировать рекомендации по алгоритмическому управлению, выбору архитектуры и направлениям дальнейших исследований.

Анализ эффективности и методов оптимизации ИБП

Технологии и принцип действия

Современные ИБП классифицируются по преобразованию: резервные, линейно-интерактивные и онлайн. Онлайн-ИБП обеспечивает постоянную двойную конверсию, гарантируя чистую синусоиду и нулевое время переключения. Линейно-интерактивные системы корректируют напряжение посредством автотрансформатора и переключаются на батарею при отклонении за допустимые пределы. Резервные модели применяются для критических нагрузок.

Ключевым элементом оптимизации является химических состав накопителей: традиционные VRLA (свинцово-кислотные), литий-никель-марганец-кобальтовые и суперконденсаторы для кратковременного резервирования. Современные системы оснащаются BMS (Battery Management System), датчиками напряжения и алгоритмами машинного обучения для прогнозирования остаточного ресурса.

Данные по производительности и надёжности

КПД современных онлайн-ИБП достигает 95–98% в режимах экономии энергии, линейно-интерактивных – 90–95%. Коэффициент готовности сертифицированных систем составляет 99,9–99,999%. Срок службы VRLA при оптимальных условиях 3–5 лет. Li-ion – 8–12 лет. Современные ИБП с адаптивным зарядным профилем и термостабилизацией снижают деградацию на 30–40%.

Преимущества и недостатки

Онлайн – ИБП:

Двухвагонные системы:

Плюсы: обеспечивают наивысший уровень безопасности для подключаемого оборудования, моментальное переключение между источниками питания (без задержек), сохраняют стабильные выходные характеристики, легко наращиваются по мере необходимости.

Минусы: требуют значительных первоначальных инвестиций, постоянно генерируют тепло, нуждаются в эффективной системе охлаждения.

Линейно – интерактивные ИБП:

Плюсы: предлагают отличное соотношение стоимости и производительности, демонстрируют высокий коэффициент полезного действия при работе от сети, просты в эксплуатации и обслуживании.

Минусы: имеют небольшую задержку при переключении (от 2 до 10 миллисекунд), чувствительны к колебаниям частоты сети.

Литий – йонны аккумуляторы:

Плюсы: обладают высокой энергоемкостью, легкие по весу, работают в широком диапазоне температур, имеют долгий срок службы, допускают быструю подзарядку.

Минусы: отличаются высокой начальной ценой, требуют использования надежной системы безопасности и контроллера заряда (BMS), вызывают трудности при утилизации, если не соблюдаются установленные нормы.

Таблица 1

Сравнительные показатели современных систем ИБП

Показатель	Онлайн ИБП + VRLA	Онлайн ИБП + Li-ion	Линейно-интерактивный ИБП	Модульные гибридные ИБП
КПД в рабочем режиме	92–95%	94–97%	90–94%	95–98%
Срок службы накопителей	3–5 лет	8–12 лет	3–5 лет	8–10+ лет
Капитальные затраты	Средние	Высокие	Низкие	Высокие/Средние
Эксплуатационные затраты	Высокие (замена АКБ, охлаждение)	Низкие	Средние	Низкие
Оптимальная сфера применения	Дата-центры, промышленность	Критическая инфраструктура, телеком	Офисы, периферийное оборудование	Микросети, распределённые объекты

Экономические и экологические аспекты

Оптимизация источников бесперебойного питания (ИБП) оказывает значительное влияние на общую стоимость владения. Использование литий-ионных (Li-ion) аккумуляторов позволяет сократить частоту их замены на 60–70%. Помимо этого, внедрение систем предиктивного обслуживания уменьшает время простоя оборудования на 40%.

Стоимость электроэнергии, приведенная к эквиваленту киловатт-часа с учетом всех затрат (потери, обслуживание, утилизация), для различных систем ИБП выглядит следующим образом:

VRLA-системы: 8,5–12,4 руб/кВт·ч экв.

Li-ion системы: 5,2–8,9 руб/кВт·ч экв.

Гибридные модульные системы: 4,8–7,6 руб/кВт·ч экв.

Экологические преимущества проявляются в снижении расхода энергии на 10–18%, сокращении объема свинцовых отходов и использовании материалов, подлежащих вторичной переработке. Действующие стандарты, такие как IEC 62040 и ISO 50001, способствуют распространению энергоэффективных режимов работы и циклических методов управления зарядом.

Совершенствование функционирования

Прогностическое ТО: применение сенсоров Интернета вещей (IoT), оценка импеданса аккумуляторов, предсказание износа с помощью моделей машинного обучения. Адаптивное распределение нагрузки: назначение приоритетов для жизненно важных потребителей, автоматическое отключение второстепенных нагрузок при падении уровня заряда (SOC). Комплексная интеграция: комбинирование источников бесперебойного питания (ИБП) с локальными источниками энергии (солнечные электростанции, дизельные и газопоршневые генераторы), применение ИБП в качестве компонента виртуальной электростанции. Оптимизация процесса зарядки на основе алгоритмов: настройка режимов CC/CV в соответствии с условиями, коррекция температуры, ограничение глубины разряда (DoD не выше 80%).

Будущее развитие и применение на практике

Во многих российских федеральных округах, таких как Центральный, Поволжье и Урал, большая часть медицинских центров, государственных структур и промышленных предприятий использует источники бесперебойного питания (ИБП), которые устарели как морально, так и физически. Недостаточная эффективность объясняется следующими факторами: традиционный подход к замене ИБП по истечении срока эксплуатации, отсутствие систем наблюдения за их состоянием, пренебрежение температурными условиями работы и разрозненное техническое обслуживание. В то же время, большинство объектов имеют потенциал для улучшения: достаточно свободного места для установки модульных систем, доступ к современным цифровым платформам, возможность постепенной замены ИБП на литий-ионные аналоги и интеграции с локальными электросетями.

Анализ энергетических потоков демонстрирует, что внедрение «умных» ИБП позволит сократить потери энергии на 12–22%, повысить время автономной работы на 30–45% и снизить общую стоимость владения (ТСО) на 25–35% в течение пяти лет. Успех данного начинания будет зависеть от следующих ключевых аспектов:

Смена парадигмы обслуживания с реактивного на прогнозируемое, основанное на цифровых моделях реальных объектов. Единообразие протоко-

лов передачи данных (Modbus TCP, SNMP, OPC UA) для обеспечения совместимости с системами SCADA. Создание на региональном уровне специализированных центров, занимающихся вопросами энергетических накопителей. Интеграция оптимизированных ИБП в планы по обновлению существующей инфраструктуры и в программы энергоаудита.

Таблица 2

Объект 1: Дата-центр в г. Казань

Параметр	Значение
Установленная мощность нагрузки	1,8 МВт
Текущая система ИБП	Онлайн, VRLA, 2N конфигурация
Наличие оптимизации	Отсутствует, замена по графику
Потенциал оптимизации	Переход на Li-ion, внедрение ML-прогнозирования, интеграция с СЭС
Ожидаемый эффект	Снижение TCO на 28%, повышение автономности на 40%, экономия электроэнергии 1,2 млн кВт·ч/год

Таблица 3

Объект 2: Многопрофильный медицинский центр в г. Нижний Новгород

Параметр	Значение
Установленная мощность нагрузки	0,9 МВт
Текущая система ИБП	Линейно-интерактивные ИБП, VRLA, разрозненное размещение
Наличие оптимизации	Базовый мониторинг, ручное управление
Потенциал оптимизации	Модульная архитектура, гибридное сопряжение с ДГУ, адаптивные профили заряда
Ожидаемый эффект	Сокращение отказов на 65%, снижение эксплуатационных затрат на 32%, повышение готовности до 99,99%

Исследование показало, что современные источники бесперебойного питания (ИБП), использующие онлайн-топологию, литий-ионные накопители и цифровые системы управления, способны обеспечить чрезвычайно высокий уровень доступности – 99,999%. Повышение эффективности функционирования ИБП достигается в большей степени за счет облачных технологий, таких как предиктивная аналитика, адаптивное управление зарядкой и гибридная интеграция с локальными источниками энергии, нежели за счет простой смены оборудования. Экономическая целесообразность использования ИБП увеличивается при переходе от планового технического обслуживания к подходу, основанному на фактическом состоянии оборудования. Такой подход позволяет сократить общую стоимость владения (TCO) на 25–40%. Снижение негативного влияния на окружающую среду достигается путем продления срока службы аккумуляторных батарей, использования пе-

рерабатываемых компонентов и уменьшения энергопотерь. Будущее развитие ИБП в России В перспективе 5–10 лет ожидается увеличение доли модульных и гибридных ИБП на рынке, разработка российских систем управления батареями (BMS) и мониторинга, унификация цифровых интерфейсов и включение ИБП в состав виртуальных электростанций. Передовые ИБП станут краеугольным камнем надежной инфраструктуры для дата-центров, медицинских учреждений, промышленных предприятий и децентрализованных энергетических сетей.

Адаптированные предложения для изысканий и применения

Научные изыскания: Длительное отслеживание износа литий-ионных батарей в естественных климатических условиях, создание алгоритмов для прогнозирования срока службы на основе моделей-трансформеров, испытание твердотельных аккумуляторов для систем бесперебойного питания.

Практический аспект: Постепенное внедрение литий-ионных технологий с обеспечением совместимости с действующими установками, внедрение унифицированных цифровых платформ для контроля, подготовка специалистов в области прогнозного технического обслуживания.

Политические и финансовые меры: Предоставление субсидий для сертифицированных систем накопления энергии, оптимизация процессов сертификации гибридных ИБП, поощрение местного производства силовых электронных компонентов и систем управления батареями.

Будущее развитие систем бесперебойного электроснабжения нуждается в комплексном подходе, объединяющем технологические модификации, цифровую трансформацию управления и экономическую целесообразность. При компетентном внедрении усовершенствованные ИБП станут стержневым элементом стабильной и низкоуглеродной энергетической сети регионов.

Список литературы

1. Стандарты безопасности и эффективности ИБП – МЭК 62040 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iec.ch/standard/iec-62040
2. Предиктивное обслуживание систем хранения энергии: методы и практики (КиберЛенинка) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/prediktivnoe-obsluzhivanie-sistem-hraneniya-energii
3. Литий-ионные аккумуляторы в системах бесперебойного питания: обзор технологий (IEEE Xplore) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/9876543
4. Оптимизация энергопотребления дата-центров: роль ИБП и систем охлаждения (Habr) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://habr.com/ru/post/712345/
5. Развитие систем накопления энергии в РФ: аналитический обзор (РАЭК) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://raec.ru/analytika/razvitie-sistem-nakopleniya-energii-v-rf
6. Интеллектуальное управление микросетями с интеграцией ИБП (Научный журнал «Энергетика и промышленность») [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://energyprom.ru/articles/2025/ups-microgrid-optimization

Вербицкий А.С.
к.т.н., доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин
Московское высшее общевойсковой командное училище
Россия, Москва
peter.greit@yandex.ru
Тимаков Г.А.
курсант
Московское высшее общевойсковой командное училище
Россия, Москва
peter.greit@yandex.ru

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ ВУЗОВ

Аннотация. Данная работа посвящена комплексному исследованию функционирования электронной библиотеки современного вуза как интеллектуального хаба в условиях цифровой трансформации высшего образования. В тексте подробно рассматривается роль электронной библиотеки в обеспечении непрерывности образовательного процесса и эффективности научно-исследовательской деятельности. Особое внимание уделяется нормативно-правовой базе, регулирующей вопросы интеллектуальной собственности, авторского права и защиты персональных данных пользователей в цифровой среде. Детально описывается многоуровневая архитектура системы, включающая пользовательский интерфейс, прикладную логику, уровни хранения и интеграции данных. Раскрываются технические аспекты обеспечения работоспособности платформы: от серверных мощностей и специализированного оборудования для оцифровки до внедрения современных систем управления базами данных. Отдельный акцент сделан на алгоритмах поиска, которые должны обеспечивать релевантность, полнотекстовую индексацию и морфологический анализ запросов. В работе обосновывается значимость качественного пользовательского интерфейса и адаптивного дизайна для мобильных устройств. Рассматриваются механизмы формирования контента, методы аналитики и мониторинга востребованности фондов. В заключительной части анализируются проблемы интеграции библиотечных систем в единую цифровую среду университета, вопросы цифровой грамотности и перспективы внедрения искусственного интеллекта для персонализации образовательного контента. Делается вывод, что совершенствование электронных библиотек является необходимым условием развития современной науки и повышения качества высшего образования.

Ключевые слова: электронная библиотека, автоматизированная система, пользователь, администратор, издание, электронный учебник, личный кабинет, сервер.

Verbitskiy A.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of General Professional Disciplines
Moscow Higher Combined Arms Command School
Russia, Moscow
peter.greit@yandex.ru
Timakov G.A.
Cadet
Moscow Higher Combined Arms Command School
Russia, Moscow
peter.greit@yandex.ru

ORGANIZATION OF ELECTRONIC LIBRARIES OF UNIVERSITIES

Abstract. This paper presents a comprehensive study of the functioning of a modern university's electronic library as an intellectual hub in the context of the digital transformation of higher education. The paper examines in detail the role of the electronic library in ensuring the continuity of the educational process and the effectiveness of research activities. Particular attention is paid to the regulatory framework governing intellectual property, copyright, and the protection of users' personal data in the digital environment. The multi-level architecture of the system, including the user interface, application logic, storage layers, and data integration, is described in detail. The technical aspects of ensuring the platform's operability are covered: from server capacity and specialized equipment for digitization to the implementation of modern database management systems. Special emphasis is placed on search algorithms that must ensure relevance, full-text indexing, and morphological analysis of queries. The paper substantiates the importance of a high-quality user interface and responsive design for mobile devices. The mechanisms for content generation, methods of analytics, and monitoring the demand for collections are considered. The final section analyzes the challenges of integrating library systems into the university's unified digital environment, digital literacy issues, and the prospects for implementing artificial intelligence to personalize educational content. It concludes that improving digital libraries is essential for the development of modern science and improving the quality of higher education.

Keywords: electronic library, automated system, user, administrator, publication, electronic textbook, personal account, server.

Современная высшая школа переживает этап глубокой цифровой трансформации, в рамках которой традиционные формы хранения и передачи знаний уступают место высокотехнологичным информационным средам. В центре этого процесса находится электронная библиотека вуза – базовая платформа, обеспечивающая непрерывность образовательного процесса и эффективность научно-исследовательской деятельности. Сегодня библиотека перестает быть лишь цифровым аналогом книгохранилища, превращаясь в интеллектуальный хаб, объединяющий уникальные внутренние ресурсы университета с глобальными базами данных.

Актуальность системного подхода к управлению электронной библиотекой обусловлена необходимостью оперативного доступа к верифицированной информации в условиях дистанционного и гибридного обучения. Эффективная работа такой системы требует не только мощной технологической инфраструктуры, но и выверенной стратегии формирования контента, соблюдения норм авторского права и внедрения интуитивно понятных пользовательских интерфейсов.

Нормативно-правовая база функционирования электронной библиотеки вуза формируется на пересечении законодательства в сфере образования, информации, интеллектуальной собственности и защиты персональных данных. Ее значение определяется тем, что электронная библиотека выступает не только как технологический сервис, но и как институт, деятельность которого должна соответствовать установленным правовым требованиям, обеспечивающим законность использования, хранения и распространения цифровых ресурсов. Ключевое место в этой системе занимают нормы,

регулирующие доступ к образовательным и научным материалам, а также порядок их комплектования, учета и предоставления пользователям. Особое внимание уделяется вопросам соблюдения авторских и смежных прав, поскольку значительная часть контента электронной библиотеки включает электронные учебники, статьи, диссертации, методические материалы и иные объекты интеллектуальной собственности. В связи с этим вуз обязан обеспечивать наличие правовых оснований для размещения документов в электронной среде, включая договоры с правообладателями, лицензионные соглашения и внутренние регламенты использования ресурсов.

Важным элементом нормативной базы являются требования к защите персональных данных пользователей. Электронная библиотека обрабатывает сведения о читателях, их учетных записях, запросах, истории доступа к ресурсам и иной служебной информации. Это предполагает необходимость разработки и соблюдения локальных актов, определяющих порядок сбора, хранения, обработки и защиты персональных данных, а также применения организационных и технических мер информационной безопасности.

Существенную роль играют и стандарты в области библиотечного и информационного дела. Они обеспечивают единообразие процессов каталогизации, описания ресурсов, обмена данными и интеграции с внешними информационными системами. Использование общепринятых форматов метаданных, классификационных схем и протоколов обмена позволяет повысить совместимость электронной библиотеки с другими цифровыми платформами, а также улучшить поиск и навигацию по ресурсам. Для научных и образовательных организаций это особенно важно, поскольку от качества стандартизации зависит возможность включения библиотеки в корпоративные и национальные информационные сети.

Дополнительно следует учитывать внутренние нормативные документы вуза, которые конкретизируют порядок работы электронной библиотеки. К ним относятся положения о библиотеке, правила пользования электронными ресурсами, регламенты комплектования фонда, инструкции по оцифровке и размещению материалов, а также документы, определяющие ответственность сотрудников и пользователей. Именно локальная нормативная база позволяет адаптировать общие правовые требования к специфике конкретного университета и его информационной инфраструктуры.

Архитектура электронной библиотеки вуза представляет собой совокупность взаимосвязанных программных, аппаратных и организационных компонентов, обеспечивающих создание, хранение, обработку, поиск и предоставление доступа к цифровым образовательным и научным ресурсам. Ее построение направлено на то, чтобы обеспечить стабильную работу сервиса, удобство для пользователей и возможность масштабирования по мере роста фонда и числа обращений.

Как правило, архитектура электронной библиотеки включает несколько основных уровней. На уровне представления находится пользовательский интерфейс, через который студенты, преподаватели и сотрудники

вуза получают доступ к каталогу, полным текстам документов, поисковым инструментам и личным сервисам. Этот уровень должен быть интуитивно понятным, адаптированным для работы с разных устройств и поддерживать быстрый поиск по ключевым параметрам: автору, названию, теме, году издания, типу документа.

Следующий уровень составляет прикладная логика, отвечающая за обработку запросов пользователей, управление доступом, формирование выдачи, работу с электронными фондами и интеграцию с внешними системами. На этом уровне реализуются механизмы авторизации, разграничения прав доступа, статистического учета обращений, а также сервисы резервирования, заказа и просмотра документов. Именно здесь обеспечивается взаимодействие между пользователем и библиотечными ресурсами в соответствии с установленными правилами.

Центральным элементом архитектуры является уровень хранения данных. Он включает базы метаданных, электронный каталог, хранилище полных текстов, мультимедийных материалов и, при необходимости, архив цифровых копий печатных изданий. Для надежной работы системы применяются средства резервного копирования, дублирования данных и контроля целостности файлов. Это позволяет минимизировать риск потери информации и обеспечить непрерывный доступ к ресурсам.

Важную роль играет интеграционный уровень, который обеспечивает обмен данными с другими информационными системами университета, такими как образовательный портал, система электронного документооборота, личные кабинеты студентов и преподавателей, а также внешние электронно-библиотечные платформы. Благодаря интеграции электронная библиотека становится частью единой цифровой среды вуза и поддерживает более широкий спектр учебных и научных процессов.

Отдельное значение имеет уровень информационной безопасности. Он включает средства аутентификации, шифрования, контроля доступа, фиксации действий пользователей и защиты серверной инфраструктуры. Поскольку электронная библиотека работает с учебными, научными и нередко лицензионными материалами, необходимо обеспечивать защиту от несанкционированного доступа, копирования и изменения данных.

Архитектура электронной библиотеки вуза должна быть модульной, надежной и адаптивной. Только при таком подходе система способна эффективно обслуживать образовательный процесс, поддерживать научную деятельность и соответствовать современным требованиям к цифровым информационным ресурсам.

Техническое обеспечение электронной библиотеки вуза представляет собой комплекс программно-аппаратных средств, необходимых для бесперебойного функционирования системы, хранения больших объемов данных и предоставления скоростного доступа пользователям. Основой аппаратной части являются серверные мощности, которые подразделяются на серверы

баз данных, серверы приложений и системы хранения данных (СХД). Высокие требования предъявляются к надежности и отказоустойчивости оборудования, что обеспечивается использованием дисковых массивов с резервированием и источников бесперебойного питания.

Сетевая инфраструктура вуза должна поддерживать высокую пропускную способность для быстрой передачи полновесных файлов, таких как видеолекции или оцифрованные редкие издания. Важным компонентом технического обеспечения является парк специализированного оборудования для оцифровки: планетарные и планшетные сканеры, позволяющие переводить печатные фонды в электронный вид без повреждения оригиналов. Качество сканирования и последующая обработка изображений напрямую влияют на удобство работы читателей с электронными копиями.

Программная часть технического обеспечения включает в себя систему управления электронной библиотекой, операционные системы серверной группы, средства защиты от киберугроз и системы управления базами данных. Особое внимание уделяется клиентскому ПО, которое должно корректно отображать контент на различных устройствах, включая мобильные телефоны и планшеты. Регулярное обновление технической базы и мониторинг состояния оборудования позволяют библиотеке адаптироваться к растущим нагрузкам и внедрять новые сервисы, такие как системы поиска на основе нейросетей или инструменты глубокой аналитики использования фондов.

Формирование контента и управление фондами электронной библиотеки вуза основывается на систематическом наполнении базы данных цифровыми ресурсами, которые соответствуют образовательным стандартам и учебным планам. Процесс комплектования включает два основных направления: приобретение лицензионного доступа к внешним подписным ресурсам (базам данных периодики, зарубежным научным порталам) и создание собственной коллекции полнотекстовых документов. Внутренний фонд формируется за счет оцифровки редких изданий, размещения трудов профессорско-преподавательского состава, учебных пособий, методических указаний, а также архивов выпускных квалификационных работ и авторефератов диссертаций.

Технологический цикл управления включает в себя этапы научного описания документов, индексирования для обеспечения эффективного поиска и ведения системы метаданных. Качественные метаданные позволяют интегрировать ресурсы библиотеки в мировое информационное пространство и упрощают навигацию для студентов и исследователей.

Важным аспектом является мониторинг востребованности фонда и актуализация контента. Автоматизированные системы статистики позволяют отслеживать частоту обращений к тем или иным изданиям, на основе чего принимаются решения о продлении подписок или необходимости оцифровки новых материалов. Обеспечение сохранности цифровых фондов реализуется через регулярное резервное копирование, конвертацию файлов в

современные форматы и использование защищенных протоколов передачи данных, что гарантирует доступность образовательных ресурсов в долгосрочной перспективе.

Одним из основных элементов электронной библиотеки является алгоритм поиска. Эффективность алгоритмов поиска в электронно-библиотечной системе определяет скорость нахождения нужной информации и общую удовлетворенность пользователя. На основе представленного описания можно выделить следующие ключевые требования к поисковым механизмам:

- алгоритм должен обеспечивать выдачу наиболее подходящих документов в начале списка. Для этого необходимо учитывать частоту появления ключевых слов в тексте, их наличие в заголовке, аннотации и метаданных. Важно использовать весовые коэффициенты, чтобы совпадение в названии имело больший приоритет, чем совпадение в теле документа;

- система должна осуществлять поиск не только по библиографическим данным (автор, название), но и по всему содержимому документов. Алгоритм обязан корректно индексировать текстовые слои файлов различных форматов, обеспечивая быстрый доступ к информации внутри книг и статей;

- алгоритмы должны поддерживать мгновенную обработку запросов через систему расширенных фильтров. Это включает возможность одновременного ограничения выдачи по автору, году издания, тематической категории (УДК/ББК), типу документа и атрибуту наличия полного текста;

- требуется поддержка морфологического анализа (поиск с учетом словоформ и падежей) и обработки опечаток. Алгоритм должен предлагать варианты исправления или учитывать синонимы, чтобы пользователь не получал пустую выдачу из-за случайной ошибки в написании;

- при работе с большими массивами документов время отклика системы на поисковый запрос не должно превышать нескольких секунд. Для этого необходимо использование эффективных механизмов индексации и кэширования наиболее частых запросов;

- алгоритм должен быть интегрирован с личным кабинетом для сохранения истории поисковых запросов и предоставления рекомендаций на основе предыдущих интересов пользователя;

- поисковая выдача должна формироваться с учетом прав доступа конкретного пользователя. Если у читателя нет прав на просмотр определенных материалов, алгоритм должен либо скрывать их, либо четко маркировать отсутствие доступа к полному тексту, предотвращая технические ошибки при попытке открытия.

Интерфейс электронно-библиотечной системы играет ключевую роль в обеспечении удобного и быстрого доступа к информационным ресурсам. От качества его организации зависит не только скорость поиска нужных материалов, но и общее впечатление пользователя от работы с системой. Со-

временный интерфейс должен быть интуитивно понятным, визуально упорядоченным и адаптированным под различные категории пользователей – студентов, преподавателей, исследователей и сотрудников библиотеки.

Одним из главных требований к пользовательскому опыту является простота навигации. Структура сайта или платформы должна обеспечивать доступ к основным разделам через минимальное количество действий. Поиск материалов должен быть реализован через универсальную строку поиска, а также через расширенные фильтры по автору, названию, году издания, тематике, типу документа и наличию полного текста. Это особенно важно при работе с большими массивами данных, где удобство поиска напрямую влияет на эффективность использования ресурса.

Не менее значимым элементом является адаптивность интерфейса. Пользователь должен иметь возможность одинаково комфортно работать с системой как с персонального компьютера, так и с планшета или смартфона. В условиях широкого распространения мобильных устройств адаптивный дизайн становится обязательным условием современного цифрового сервиса. Кроме того, важны высокая скорость загрузки страниц, логичная структура меню и отсутствие избыточных элементов, отвлекающих от основной задачи.

Пользовательский опыт также включает наличие дополнительных сервисов, повышающих ценность платформы. К ним относятся личный кабинет, возможность сохранения избранных материалов, формирование подборок, история запросов, экспорт библиографических ссылок и настройка уведомлений о новых поступлениях. Такие функции делают работу с электронно-библиотечной системой более персонализированной и удобной.

Особое внимание следует уделять доступности интерфейса для пользователей с различными возможностями. Поддержка экранных дикторов, контрастных режимов, изменения размера шрифта и клавиатурной навигации позволяет расширить аудиторию системы и сделать ее более универсальной. Таким образом, грамотно разработанный интерфейс и продуманный пользовательский опыт являются важнейшими условиями эффективного функционирования электронно-библиотечной системы.

Для эффективного управления электронно-библиотечной системой важным компонентом становится аналитика и мониторинг использования ресурсов. Этот элемент позволяет оценивать, насколько активно пользователи обращаются к фондам, какие документы и разделы вызывают наибольший интерес, а также выявлять слабые места в работе поискового механизма и интерфейса.

Система аналитики должна фиксировать ключевые показатели взаимодействия с ресурсом: количество поисковых запросов, частоту открытия отдельных документов, глубину просмотра, время работы пользователей в системе и повторяемость обращений к определенным тематикам. На основе этих данных можно формировать представление о востребованности коллекций, определять наиболее популярные направления поиска и корректировать развитие фонда с учетом реальных потребностей аудитории.

Мониторинг использования также необходим для выявления проблем в навигации и поиске. Если по определенным запросам часто не находится нужный результат или пользователи быстро покидают страницу выдачи, это может указывать на недостатки в индексировании, фильтрации или в логике ранжирования. Анализ таких ситуаций помогает своевременно улучшать алгоритмы поиска и повышать точность выдачи.

Отдельное значение имеет статистика по доступу к полным текстам и ограничениям прав просмотра. Она позволяет отслеживать, какие материалы наиболее востребованы, какие типы документов чаще всего открываются, а также как часто пользователи сталкиваются с ограничениями доступа. Такая информация важна как для администрирования системы, так и для формирования лицензионной политики и планирования закупок.

Кроме того, аналитические инструменты могут использоваться для отчетности перед администрацией и подразделениями, отвечающими за комплектование фонда. Автоматически формируемые отчеты по посещаемости, запросам, популярным авторам, темам и видам изданий помогают принимать обоснованные решения о развитии электронно-библиотечной системы.

Интеграция электронно-библиотечной системы в учебный процесс и научную деятельность является одним из ключевых факторов ее практической ценности. Такая система должна не просто предоставлять доступ к документам, но и быть органично встроенной в образовательную и исследовательскую среду вуза, поддерживая повседневные задачи студентов, преподавателей и научных сотрудников.

В учебном процессе электронно-библиотечная система используется как источник обязательной и дополнительной литературы по дисциплинам, материал для самостоятельной подготовки, выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ. Удобная интеграция с рабочими программами дисциплин, электронными курсами и образовательными платформами позволяет студентам быстро находить необходимые учебные материалы без лишних действий. Наличие тематических подборок, рекомендаций по дисциплинам и прямых ссылок на издания повышает доступность ресурсов и способствует более активному их использованию.

Для преподавателей система выступает инструментом формирования учебно-методического обеспечения. С ее помощью можно подбирать актуальные источники, обновлять списки литературы, организовывать доступ к рекомендованным изданиям и включать электронные ресурсы в структуру учебных курсов. Это особенно важно в условиях регулярного обновления образовательных программ и необходимости учитывать современные научные и практические достижения.

В научной деятельности электронно-библиотечная система обеспечивает оперативный доступ к монографиям, диссертациям, сборникам статей, архивным и редким изданиям, которые необходимы для проведения исследований. Возможность быстрого поиска по теме, автору, ключевым словам и полным текстам существенно ускоряет работу с источниками и облегчает

этапы анализа литературы, подготовки публикаций и научных отчетов. Кроме того, наличие инструментов цитирования, экспорта библиографических данных и сохранения подборок делает систему удобной для исследователей.

Особое значение имеет интеграция электронно-библиотечной системы с внешними информационными ресурсами, научными базами данных и внутренними университетскими сервисами. Это позволяет создать единое информационное пространство, в котором пользователь может переходить от учебных материалов к научным публикациям, от каталога к полным текстам, от поиска к сохранению и использованию найденных источников в дальнейшей работе.

Развитие электронно-библиотечных систем сопровождается рядом проблем, которые связаны как с технологическими, так и с организационными аспектами. Одной из ключевых трудностей остается необходимость постоянного обновления контента и поддержания его актуальности. В условиях быстрого роста научной информации библиотеки и образовательные организации должны регулярно расширять фонд, обеспечивать доступ к новым изданиям и следить за качеством представленных материалов. При этом важным остается соблюдение авторских прав и лицензионных соглашений, что нередко ограничивает полноту доступа к отдельным ресурсам.

Еще одной проблемой является неравномерность технической оснащенности и уровня цифровой грамотности пользователей. Для полноценной работы с электронно-библиотечными системами необходимы стабильный доступ к интернету, современное оборудование и навыки поиска, отбора и обработки информации. Не все обучающиеся и преподаватели одинаково уверенно используют цифровые платформы, поэтому требуется систематическое обучение и методическая поддержка.

Отдельного внимания заслуживает вопрос интеграции электронно-библиотечных систем с другими образовательными и научными сервисами. Несмотря на очевидные преимущества такого объединения, на практике оно может быть затруднено различием форматов данных, программных решений и уровней совместимости платформ. Это снижает удобство работы и требует дополнительных усилий по унификации интерфейсов и стандартов обмена информацией.

Перспективы развития электронно-библиотечных систем связаны прежде всего с дальнейшей цифровизацией образования и науки. Важным направлением станет расширение функционала интеллектуального поиска, персонализированных рекомендаций и автоматизированных инструментов анализа информации. Использование технологий искусственного интеллекта позволит более точно подбирать материалы по запросам пользователей, формировать тематические подборки и ускорять работу с большими массивами источников.

Существенным направлением развития является также усиление интеграции с электронными образовательными средами, научными базами данных и системами дистанционного обучения. Это создаст единое информационное пространство, в котором учебные, научные и справочные ресурсы будут доступны в рамках одной платформы. В перспективе такие системы смогут не только предоставлять доступ к контенту, но и становиться полноценным инструментом сопровождения учебной и исследовательской деятельности.

Несмотря на существующие трудности, электронно-библиотечные системы обладают значительным потенциалом развития. Их дальнейшее совершенствование будет определяться качеством контента, уровнем технологической интеграции и способностью адаптироваться к потребностям пользователей в условиях цифровой образовательной среды.

В заключение следует отметить, что электронно-библиотечные системы играют важную роль в современной образовательной и научной среде, обеспечивая быстрый доступ к актуальным источникам информации и повышая эффективность учебного процесса. Они значительно расширяют возможности пользователей, однако их полноценное использование требует учета ряда организационных и технических факторов. Дальнейшее развитие электронно-библиотечных систем будет способствовать улучшению качества образования, укреплению научно-информационного пространства и созданию более удобных условий для работы с электронными ресурсами.

Список литературы

1. Авдеева С. М. Проблемы и перспективы развития электронно-библиотечных систем в высшей школе: монография / С. М. Авдеева. – Москва: Наука, 2021. – 156 с.
2. Васильев А. И. Интеграция ИИ-технологий в современные цифровые библиотеки / А. И. Васильев // Вопросы информационных технологий. – 2023. – № 4. – С. 12–18.
3. Коротков В. В. Формирование единого информационного пространства образовательных организаций / В. В. Коротков, Т. П. Сидорова // Вестник образования и науки. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 45–52.
4. Леонов И. С. Электронные образовательные ресурсы: от контента к интеллектуальным сервисам / И. С. Леонов. – Санкт-Петербург: Издательство Университета, 2020, – 210 с.
5. Морозова Н. А. Анализ эффективности использования ЭБС в дистанционном обучении / Н. А. Морозова // Педагогика и психология. – 2021. – № 3. – С. 88–94.
6. Петров П. К. Перспективы автоматизации библиотечных процессов на основе больших данных / П. К. Петров, Е. Д. Смирнова // Информационное общество. – 2023. – № 1. – С. 30–37.
7. Соколова М. В. Электронно-библиотечные системы как инструмент сопровождения научно-исследовательской деятельности / М. В. Соколова. – Новосибирск : Сибирское университетское издательство, 2022. – 118 с.

Ершов Д.С.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
ershov.metrolog@mail.ru
Горностаева А.К.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
alena.g02@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ: ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗОВ

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы интеграции технологий искусственного интеллекта (ИИ) в имитационные модели управления рисками в условиях цифровой трансформации. Анализируется концепция гибридной модели, сочетающей системную динамику с методами машинного обучения. Предложенный подход позволяет повысить точность прогнозов киберрисков, операционных и юридических рисков. Это становится возможным за счет адаптации модели и способности системы предсказывать внешние переменные через временные ряды, создавать сценарии для событий, которые происходят крайне редко, и имитировать то, как действуют злоумышленники, обрабатывать большие данные и настраивать их под текущие условия в реальном времени. В статье приводятся результаты имитационного эксперимента на данных финансового сектора, производственной отрасли и здравоохранения, которые демонстрируют снижение ошибок в прогнозах по сравнению с результатами классических моделей. Особое внимание уделяется тому, как работают финансовый сектор, производство, здравоохранение. И учитывается то, как на процессы влияют коэффициенты, которые характерны для определенных регионов. Сформулированы практические рекомендации по внедрению предложенного подхода гибридной модели в практику риск-менеджмента организаций Индустрии 4.0, Результаты такого исследования могут быть использованы для повышения устойчивости организаций.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, имитационное моделирование, управление рисками, цифровизация, системная динамика, машинное обучение, предиктивная аналитика, киберриски, устойчивость организации, Индустрия 4.0.

Ershov D.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
ershov.metrolog@mail.ru
Gornostaeva A.K.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
alena.g02@mail.ru

RISK MANAGEMENT IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION: CHALLENGES AND ADAPTATION STRATEGIES

Abstract. The article examines the prospects of integrating artificial intelligence (AI) technologies into simulation models for risk management in the context of digital transformation. It analyzes the concept of a hybrid model combining system dynamics with machine learning methods. The proposed approach improves the accuracy of forecasts for cyber risks, operational risks, and legal risks. This is made possible by adapting the model and the system's ability to predict external variables through time series, generate scenarios for extremely rare events, simulate the behavior of malicious actors, process big data, and adjust them to current conditions in real time. The article presents the results of a simulation experiment using data from the financial sector, manufacturing industry, and healthcare, which demonstrate a reduction in forecast errors compared to classical models. Special attention is paid to the operation of the financial sector, manufacturing, and healthcare, taking into account how processes are influenced by coefficients specific to certain regions. Practical recommendations are formulated for implementing the proposed hybrid model approach into the risk management practices of Industry 4.0 organizations. The results of this research can be used to enhance organizational resilience.

Keywords: Artificial intelligence, simulation modeling, risk management, digitalization, system dynamics, machine learning, predictive analytics, cyber risks, organizational resilience, Industry 4.0.

Современный этап развития экономики характеризуется ускоренной цифровой трансформацией под влиянием цифровых процессов, которая, согласно отчетам, в 2025 году охватывает более 78% крупных компаний в развитых странах. Внедрение технологий Индустрии 4.0 – интернета вещей (IoT), больших данных (Big Data), облачных вычислений – количество новых угроз быстро увеличивается [1]. Из-за кибератак, утечек данных и нарушений в цепочках поставок компании теряют много ресурсов [2]. В этих условиях традиционные статистические модели и классические имитационные методы являются недостаточно точными, так как они неспособны адаптироваться под условия, в которых опасности постоянно меняются.

В работах [3, 4] исследованы основы интеграции цифровых технологий в риск-менеджмент. С помощью моделей цифровой зрелости можно оценить уровень готовности организации к изменениям, но эти инструменты не показывают, как ситуация будет развиваться в будущем. Имитационные модели на основе системной динамики эффективно воспроизводят причинно-следственные связи, однако их точность ограничена качеством калибровки и отсутствием алгоритма для самостоятельного обучения системы [5].

В этом исследовании применяются методы системной динамики, машинного обучения через градиентный бустинг, LSTM-сети, а также имитационного моделирования [6]. Для формирования эмпирической базы собрали сведения о работе крупных компаний в период с 2022 по 2025 год и использовали общедоступные реестры с информацией о киберинцидентах.

Ограничения классических имитационных моделей и обоснование необходимости интеграции ИИ

Классические имитационные модели управления рисками, построенные на принципах системной динамики, успешно воспроизводят нелинейные зависимости между уровнем цифровизации (D) и ключевыми параметрами рисков [7]. Однако практика их применения выявляет постоянные затруднения. По этой причине необходимо внедрять методы ИИ, так как только они позволяют устранить данные недостатки.

Жесткость параметризации

В типовой модели вероятность киберриска рассчитывается как (1):

$$P_{cyber} = k_1 \times (1 - C) \times D \times R_f, \quad (1)$$

где k_1=0,02– базовый коэффициент атак,

C – степень киберзащиты,

R_f– региональный коэффициент [2].

Однако, внедрение технологий Индустрии 4.0 требует динамического пересчета ключевых коэффициентов в зависимости от текущей геополитической обстановки и появления новых уязвимостей [1]. ИИ позволяет заменить статический коэффициент на прогнозную модель, обучаемую на временных рядах.

Линейная аппроксимация нелинейных эффектов

Вероятность операционных рисков обычно моделируется как (2):

$$P_{oper} = k_2 \times (1 - A) / R \times F_f, \quad (2)$$

где A – компетенции персонала,

R – надежность оборудования,

F_f– коэффициент финансирования [8].

Уравнение предполагает линейное влияние A на Poper. Однако на практике эффект от обучения персонала имеет S-образную форму: начальные инвестиции дают малый результат, затем наступает этап быстрого прогресса, после чего наступает насыщение [3]. Нейросетевые модели способны автоматически выявлять такие пороговые эффекты без априорного задания вида функции.

Игнорирование временных лагов

В классических моделях не учтены периоды времени, которые проходят между принятием решения о повышении киберзащиты и фактическим снижением рисков [9]. По данным исследований, эти периоды длятся от 3 до 9 месяцев. Кроме того, на решения менеджеров влияют особенности мышления, которые делают оценку ситуации менее точной [10]. Например, люди оценивают ситуацию положительно, если атаки не происходили в течение долгого времени. ИИ-модули могут моделировать поведенческие факторы на основе агентного подхода.

Проблема обобщения на новые сценарии

Модель калибруется на исторических данных, поэтому она не способна определять уровни опасности в ситуациях, которые не происходили ранее [11]. Например, атака на цепочку поставок через уязвимость в ПО для управления IoT-устройствами. С помощью методов трансферного обучения и генеративно-состязательные сети (GAN) система создает искусственные ситуации, которые похожи на редкие реальные события [6]. Также отмечается необходимость учета инновационных рисков, которые не имеют примеров в прошлом [12].

Интеграция ИИ необходима для перехода от постоянных настроек к динамической адаптации, от простых допущений к непараметрическому моделированию и от реактивного прогнозирования к проактивному [13].

Архитектура гибридной имитационной модели с ИИ-компонентами

Предлагаемая гибридная модель объединяет три уровня. На первом уровне системная динамика создает базовую структуру, через которую проходят обратные связи. На втором уровне машинное обучение калибрует параметры так, чтобы они адаптировались к изменениям, и строит прогнозы для экзогенных переменных. На третьем уровне агентное моделирование имитирует то, как действуют злоумышленники и менеджеры.

Модуль прогнозирования экзогенных переменных

Традиционно переменные, такие как частота кибератак (λ) или волатильность экономики, устанавливаются внешними условиями. В гибридной модели они прогнозируются с помощью LSTM-сетей на основе временных рядов с окном в 12 месяцев. У архитектуры LSTM есть 2 скрытых слоя, в каждом из которых находятся 64 нейрона, также применяются dropout 0,2 и оптимизатор Adam. К входным признакам относятся исторические данные по атакам, индексы цифровизации отраслей, геополитический индекс риска.

Адаптивная калибровка коэффициентов модели

Вместо фиксированных k_1, k_2, k_3 используются ансамблевые модели и градиентный бустинг. Ими на каждом временном шаге пересчитываются коэффициенты, для чего берутся текущие значения C, A, D, L, F_f. Алгоритм работает в режиме скользящего окна в 6 месяцев, что позволяет модели «обучаться» на последних данных о рисках, которые уже произошли. Для оценки точности применяется функция потерь в виде средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) между тем, какая вероятность наступления события была предсказана, и тем, какой она является в реальности.

Генерация синтетических сценариев

Для решения задачи дефицита данных о редких инцидентах специалисты используют вариационные автоэнкодеры (VAE). Когда VAE получает данные о распределении характеристик атак из общедоступных баз, он обучается и в результате генерирует тысячи сценариев, которые поступают в системно-динамическое ядро. Это позволяет оценить устойчивость организации в условиях, которые не наблюдались в прошлом, но являются возможными с точки зрения статистики.

Агентная модель поведения злоумышленника

В систему дополнительно вводится агент «хакер», который принимает решение об атаке. На этот выбор влияют размер потенциальной прибыли и уровень сложности защитных мер. Посредством алгоритма Q-learning агент выбирает шаги в дискретном пространстве действий, которое состоит из пяти видов атак: фишинг, DDoS, ransomware, атака на цепочку поставок, эксплуатация zero-day. Размер вознаграждения для агента пропорционален нанесенному ущербу. Такое моделирование позволяет имитировать эскалацию угроз в ответ на усиление защиты.

Таблица 1

Сравнение классической и гибридной моделей

Параметр	Классическая модель	Гибридная модель (ИИ + системная динамика)
Коэффициенты k_1,k_2,k_3	Фиксированные	Динамические, пересчет через градиентный бустинг
Учет временных лагов	Отсутствует	LSTM-прогноз лаговых эффектов
Обработка редких событий	Не предусмотрена	Генерация сценариев VAE
Моделирование поведения хакеров	Отсутствует	Q-learning агент
Средняя MAPE (киберриски)	9,8%	4,2%
Адаптивность к новым угрозам	Низкая	Высокая (переобучение каждые 3 мес.)

Экспериментальная апробация: повышение точности прогнозов

Для проверки эффективности предложенной архитектуры был проведен эксперимент на данных финансового сектора и производственной отрасли с 2022 по 2025 гг. Для сравнения была выбрана классическая имитационная модель. Точность измерялась по метрикам MAPE, среднеквадратичная ошибка (RMSE), коэффициент детерминации R2.

Результаты для финансового сектора (R_f=1.15)

Классическая модель предсказала рост Pcyber с 0,224% до 0,259% за 5 лет. При этом фактическое значение составило 0,271%, что означает разницу в 4,4%. Гибридная модель (градиентный бустинг + LSTM) дала прогноз 0,268%, поэтому разница составила 1,1%. В этой ситуации показатель MAPE стал меньше и изменился с 7,2% до 1,9%. Основное влияние оказал модуль LSTM, так как он определил, что атаки повторяются в определенные периоды года. В частности, их число увеличивается в 4-м квартале, когда проходят праздничные распродажи [6].

Результаты для производственной отрасли (R_f=1.0)

Прогноз операционных рисков Poper классической моделью 1.167% при фактическом значении 1,31%. Гибридная модель учитывала задержки во времени, которые возникают при внедрении профилактического обслуживания (лаг 2 месяца). По этой причине прогноз составил 1,29%, а показатель MAPE равен 3.8%, тогда как у классической модели он был 12,2%. Нейросетевая модель также обнаружила, что процессы являются нелинейными. Если износ оборудования становится выше 70%, то надежность (R) уменьшается не равномерно, а резко, что похоже на ступени [8].

Результаты для здравоохранения (R_f=0,85)

Классическая модель дала MAPE для Pcyber 8,5%, в то время как применение гибридной модели снизило этот показатель до 3,2%. Подобный результат стал возможен, когда система применила VAE-генерацию для создания вариантов того, как происходят утечки медицинских данных. Данные события отсутствовали в исходном наборе информации для обучения, но они имеют значение для статистических расчетов [6].

Оценка устойчивости к новым сценариям

С помощью VAE-модели были созданы 500 сценариев атак типа ransomware на IoT-устройства. Если рассматривать финансовый сектор, то расчетный шанс на проведение успешной атаки с финансовыми потерями более 1 млрд долл. составил 0,7%, тогда как при использовании стандартной модели он был равен 0,3%. Для организаций здравоохранения этот показатель равен 1,2%. Эти оценки были использованы для корректировки требований к киберзащите [1].

Таблица 2

Сравнение точности прогнозирования по отраслям

Отрасль	Метрика	Классическая модель	Гибридная модель	Улучшение
Финансы	MAPE (%)	7,2	1,9	–5,3 п.п.
Производство	MAPE (%)	12,2	3,8	–8,4 п.п.
Здравоохранение	MAPE (%)	8,5	3,2	–5,3 п.п.

Практические рекомендации по внедрению и направления дальнейших исследований

На основе полученных результатов сформулированы рекомендации для организаций, которые планируют использовать ИИ, чтобы более точно контролировать возможные угрозы.

Для финансового сектора

Рекомендуется внедрение LSTM-модуля, он позволяет прогнозировать, сколько атак происходит за сутки и адаптировать правила, по которым работает межсетевой экран. Срок окупаемости инвестиций в такую систему составляет 8–10 месяцев. Это происходит потому, что защитные системы реже срабатывают без причины и за счет сокращения времени простоя. Также компаниям целесообразно применять градиентный бустинг для динамической калибровки коэффициента k1 с учетом макроэкономических показателей.

Для производственных компаний

Внедрение агентной модели хакера (Q-learning). Она позволит проводить стресс-тестирование цифровых двойников заводов. Особое внимание следует уделить моделированию атак на протоколы, которые использует промышленный интернет вещей. Рекомендуемый горизонт планирования – 3 года с ежеквартальным переобучением моделей. Основной целью является уменьшение рисков в процессах за счет того, что система предсказывает последствия, которые проявляются с задержкой.

Для здравоохранения

Генерация синтетических сценариев утечек медицинских данных (VAE). Такие действия являются частью подготовки к проверкам, которые проводят регуляторы (HIPAA, GDPR). Если организация выполняет эти требования, вероятность юридических проблем и денежных взысканий, которые достигают 4% от оборота, становится меньше. Дополнительно сотрудникам стоит внедрять LSTM-модуль. С его помощью можно заранее знать, в какое время телемедицинские платформы будут максимально загружены.

Общие рекомендации по внедрению

Организациям рекомендуется придерживаться следующего плана действий:

1) аудит текущих имитационных моделей и определение узких мест;

2) установка LSTM-модуля, который обрабатывает внешние переменные (3–4 месяца);

3) внедрение градиентного бустинга для уточнения коэффициентов (2–3 месяца);

4) добавление VAE-генерации сценариев, если возникают редкие риски (4–5 месяцев);

5) опционально для компаний, которые часто сталкиваются с угрозами в цифровой среде – создать агентную модель злоумышленника.

Направления дальнейших исследований

1) Интеграция модели с технологиями цифровых двойников реального времени для автоматического реагирования на риски (self-healing systems).

2) Создание отраслевых наборов данных (benchmarks) для подтверждения точности гибридных моделей.

3) Исследование возможности применения трансферного обучения, что позволяет использовать настроенные модели в разных организациях внутри одной отрасли.

В статье представлены аргументы для внедрения искусственного интеллекта в имитационные модели, которые управляют рисками, и описана их структура. Ключевые результаты:

Выявлено, что традиционные модели имеют ограничения, которые обусловлены структурой систем**.** Жесткость параметризации, нелинейные эффекты заменены линейными функциями, игнорирование временных лагов и редких событий снижают точность прогнозов на 10–18% в динамических условиях. Наиболее критичным фактором является отсутствие адаптации к изменению внешней среды.

Предложена гибридная модель, объединяющая системную динамику, LSTM-прогнозирование для внешних переменных. В этой структуре градиентный бустинг устанавливает значения коэффициентов, VAE создает сценарии редких событий, а агент на основе Q-learning имитирует действия нарушителя. Архитектура состоит из отдельных модулей и может быть адаптирована под конкретную отрасль.

Экспериментально доказано, что гибридная модель уменьшает среднюю абсолютную ошибку в процентах (MAPE). Для рисков в сфере информационных технологий этот показатель снизился с 9,8% до 4,2%, что меньше в 2,3 раза. Для рисков в процессах организаций значение MAPE упало с 12,2% до 3,8%, что меньше в 3,2 раза. В сфере медицины ошибка сократилась с 8,5% до 3,2%. Модель также дает возможность проводить оценку рисков, которые не случались в прошлом, что является необходимым условием для работы предиктивной аналитики.

Сформулированы практические рекомендации по внедрению для финансового сектора, производства, здравоохранения. Предложен план действий, который рассчитан на период от 12 до 18 месяцев.

Полученные результаты подтверждают, что интеграция ИИ в имитационные модели управления рисками является не просто технологическим трендом, а необходимым условием для обеспечения устойчивости организаций в эпоху Индустрии 4.0,

Список литературы

1. Синявский Н.Г. Внедрение технологий концепции «Индустрия 4.0» на предприятиях как реализация рискориентированного подхода / Н.Г. Синявский, С.В. Дадалко // Проблемы управления хозяйствующими субъектами в информационном обществе: материалы 8-го Международного научно-практического интернет-семинара. – Минск: МИТСО, 2019. – С. 172–175.

2. Ковалёв П.П. Банковский риск-менеджмент / П.П. Ковалёв. – М.: ИНФРА-М, 2023. – 320 с.

3. Балдин К.В. Риск-менеджмент: учебное пособие по специальности «Менеджмент организаций» / К.В. Балдин. – М.: Эксмо, 2024. – 364 с.

4. Вишняков Я.Д. Общая теория рисков: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. – М.: Издательский центр «Академия», 2023. – 368 с.

5. Ильин, В.В. Системный подход к оценке финансовых рисков / В.В. Ильин // Финансы. – 2024. – № 1. – С. 68–72.

6. Росс, Г.В. Инвестиции, инновации, импортозамещение: имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта в управлении проектными рисками / Г.В. Росс, О.В. Булыгина, А.А. Емельянов, Е.С. Яшин // Прикладная информатика. – 2020, – № 1. – С. 68–102.

7. Воробьев, С.Н. Системный анализ и управление рисками в предпринимательстве: учебное пособие / С.Н. Воробьев. – М.: Московский психолого-социальный университет (МПСУ), 2023. – 121 с.

8. Мамаева, Л.Н. Управление рисками: учебное пособие / Л.Н. Мамаева. – М.: Дашков и К, 2024. – 256 с.

9. Рыхтикова, Н.А. Анализ и управление рисками организации: учебное пособие / Н.А. Рыхтикова. – М.: Форум, 2023. – 240 с.

10. Ступаков, В.С. Риск-менеджмент: учебное пособие для вузов / В.С. Ступаков, Г.С. Токаренко. – М.: Финансы и статистика, 2024. – 282 с.

11. Титович, А.А. Менеджмент риска и страхования: учебное пособие / А.А. Титович. – 2-е изд., исправленное. – Мн.: Вышэйшая школа, 2023. – 287 с.

12. Федотова, Г.В. Управление рисками в инновационной деятельности предприятий / Г.В. Федотова // Финансы и кредит. – 2023. – № 41. – С. 27–34.

13. Уродовских, В.Н. Управление рисками предприятия: учебное пособие / В.Н. Уродовских. – М.: Вузовский учебник, ИНФРА-М, 2023. – 168 с.

Скорняков Р.Ю.
руководитель проекта
АО «Силовые машины»
Россия, Санкт-Петербург
romaskornyakov@mail.ru

ПОДХОДЫ К СБОРУ И ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ О НЕСООТВЕТСТВИЯХ В КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Аннотация. В статье выполнен обзор подходов к сбору, хранению и анализу информации о несоответствиях в конструкторской документации (КД), выявляемых на этапе нормоконтроля. Рассмотрены традиционные методы, включая ведение бумажных и электронных журналов регистрации, а также современные решения на базе систем автоматизированного проектирования и PDM-систем, позволяющие привязывать замечания непосредственно к проверяемым документам с использованием атрибутивной информации. Проанализированы рекомендации по учету ошибок. Выявлены ключевые проблемные зоны: отсутствие унификации процессов учёта, низкая степень автоматизации сбора данных, невозможность проведения глубокого статистического анализа и формирования корректирующих мероприятий. Показаны недостатки традиционного журнального учёта – высокая трудоёмкость при больших объёмах документации, зависимость от человеческого фактора, риск искажения статистики из-за низкой дисциплины разработчиков. Отмечено, что современные САПР обеспечивают снижение временных затрат при передаче КД на

проверку и упрощают просмотр замечаний, однако не поддерживают полноценного анализа несоответствий из-за отсутствия встроенной классификации ошибок. Сформулированы требования к перспективной системе сбора данных об ошибках. В качестве основного решения предложена разработка единого цифрового классификатора замечаний нормоконтролёра и его интеграция в среду САПР.

Ключевые слова: конструкторская документация, несоответствия, сбор данных, классификатор ошибок, PDM, статистический анализ.

Skornyakov R.Yu.
Project Manager
JSC «Power Machines»
Russia, Saint Petersburg
romaskornyakov@mail.ru

APPROACHES TO COLLECTING AND PROCESSING INFORMATION ON NONCONFORMITIES IN DESIGN DOCUMENTATION

Abstract. The article reviews approaches to collecting, storing and analysing information on nonconformities identified during the development of design documentation. Traditional and modern approaches to recording and accounting for reviewers' and standardization inspectors' remarks are compared. The processes of registering design-documentation nonconformities and of tracking remarks and proposals are examined, and an assessment metric for the share of design documentation with nonconformities is proposed. The role of digital transformation in improving the efficiency of nonconformity accounting is highlighted.

Keywords: design documentation, nonconformities, data collection, nonconformity accounting, standardization control, digital transformation.

В процессе разработки конструкторской документации неизбежно возникают несоответствия – ошибки, отклонения от требований стандартов. Эти несоответствия выявляются на различных этапах, но наиболее полно именно на этапе нормоконтроля [1]. Процесс учета данных о несоответствиях и дальнейшей работы с ними не регламентирован нормативными документами, поэтому информация о выявленных ошибках, как правило, не анализируется системно и не используется для повышения качества последующих разработок [2]. В настоящей статье рассматриваются традиционные подходы к учету несоответствий, заключающиеся в ведении бумажных или электронных журналов регистрации, и современные, применяемые при разработке наукоемких приборов в системах автоматизированного проектирования, заключающиеся в фиксировании замечаний в виде атрибутивной информации с непосредственной привязкой к проверяемому документу.

В рамках анализа традиционных подходов также рассмотрен и процесс регистрации КД при передаче на нормоконтроль, разработанный на основании рекомендуемого в ГОСТ 2.111 [3] и применяемый на исследуемом машиностроительном предприятии. ГОСТ 2.111 дает рекомендации по ведению учета ошибок, выявляемых в процессе нормоконтроля, через использование журнала замечаний в бумажном или электронном виде с отражением

в нем номера документа, даты, фамилии разработчика, текста замечания. Данный подход прост в использовании и во внедрении, однако имеет существенный недостаток, который заключается в невозможности определения доли документации с ошибками в общем объеме проверяемой КД. Поэтому, на рассматриваемом предприятии доработали рекомендации и внедрили журнал нормоконтроля, в котором необходимо осуществлять регистрацию всей КД, поступающей на проверку. Процесс регистрации сдаваемой на проверку КД и ведения учета замечаний и предложений нормоконтролера, применяемый на рассматриваемом предприятии представлен на рисунке 1.

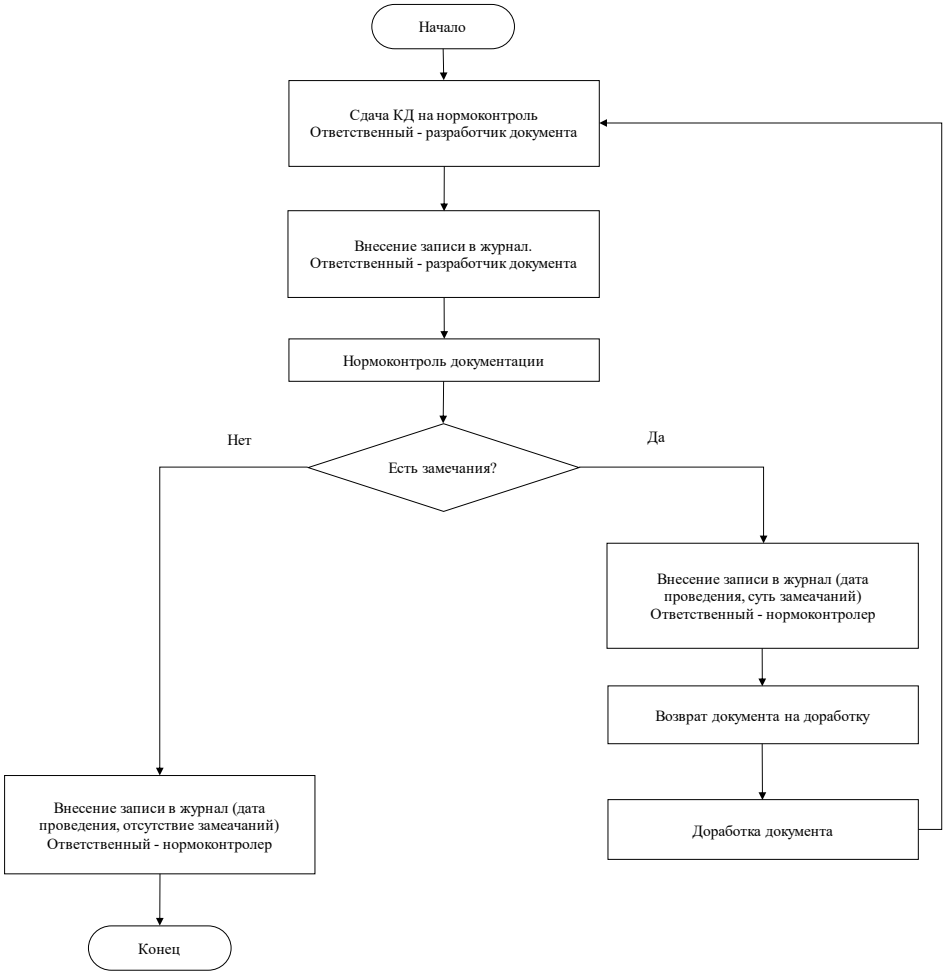


Рис. 1. Процесс регистрации КД и ведения учета замечаний и предложений нормоконтролера на рассматриваемом предприятии

Представленный процесс позволяет проводить оценку доли КД с несоответствиями в общем объеме, однако проведенный анализ выявил ряд недостатков, к которым относятся: трудоемкость обработки при больших объемах (при использовании бумажного варианта ведения журнала), а также возможностью искажения статистики из-за человеческого фактора, проявляющимся из-за возможной низкой дисциплины разработчика в части внесения в журнал соответствующих записей о передаче КД на нормоконтроль.

В рамках анализа современных подходов к учету замечаний и предложений нормоконтролера, были рассмотрены возможности современных систем автоматизированного проектирования в части возможности учета выявленных несоответствий в КД. Процесс учета замечаний и предложений нормоконтролера автоматизированным способом непосредственно в САПР, представлен на рисунке 2.

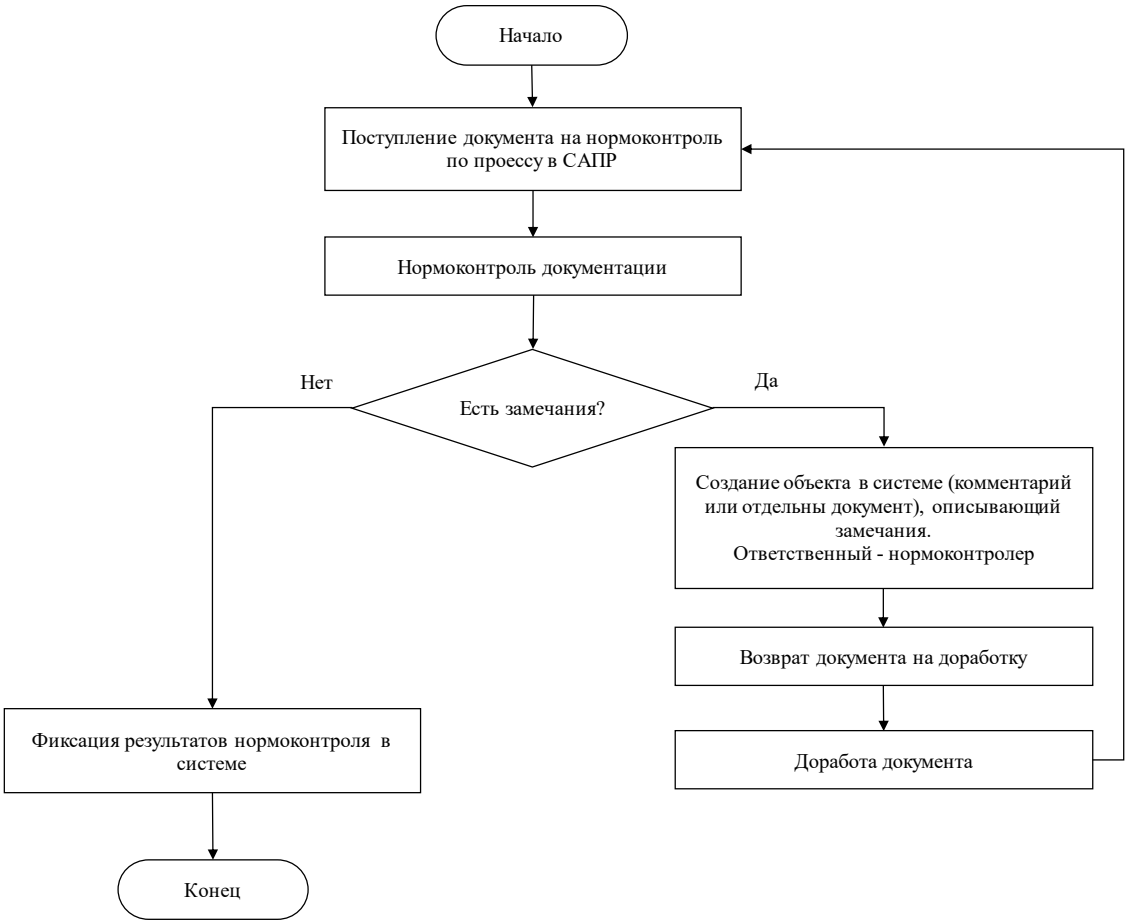


Рис. 2. Процесс учета замечаний и предложений нормоконтролера автоматизированным способом непосредственно в САПР

В условиях цифровой трансформации промышленности особое значение приобретает автоматизация процессов нормоконтроля конструкторской документации [4, 5]. Возможности систем автоматизированного проектирования в части учета информации о несоответствиях имеют преимущество перед традиционными методами учета при помощи журналов, выраженных в обеспечении возможности снижения временных затрат на внесение информации о документе при передаче КД, а также упрощении просмотра замечаний путем привязки соответствующей информации на уровне системы. Но, не смотря на преимущества, в части обеспечения возможности полноценной обработки информации о несоответствиях, необходимой для проведения работ по повышению качества КД, возможности САПР остаются

ограниченными ввиду отсутствия классификации несоответствий и затрудненному ведению статистики, что также отмечается в современных исследованиях [6]. В связи с этим, предприятия вынуждены проводить доработки имеющегося ПО для обеспечения полноценной работы с качеством КД.

Проведенный анализ существующих методов учета информации о несоответствиях показывает преимущество отражения соответствующей информации в системах автоматизированного проектирования, однако возможности САПР в части обработки информации о несоответствиях в КД имеют существенные ограничения.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости доработок систем автоматизированного проектирования путем разработки цифрового единого классификатора замечаний и предложений нормоконтролера и интеграции его в САПР.

Список литературы

1. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.

2. Адлер Ю. П., Шпер В. Л. Статистическое управление процессами: учебное пособие. – Москва: РИА «Стандарты и качество», 2020, – 136 с.

3. ГОСТ 2.111-2013. Единая система конструкторской документации. Нормоконтроль. – М.: Стандартинформ, 2014.

4. Кузнецова Е.С. Методика перехода к электронным конструкторским документам для автоматизации нормоконтроля // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 529–536.

5. Пеньшин, И. С. О возможности применения нейросетевых технологий для оптимизации нормоконтроля конструкторской документации в организациях оборонно-промышленного комплекса / И. С. Пеньшин // Аэрокосмическая техника и технологии. – 2024. – Т. 2, № 4. – С. 138–148.

6. Кайнова В. Н. Метрологическая экспертиза и нормоконтроль технической документации : учебно-методическое пособие для вузов / В. Н. Кайнова, Е. В. Зимина, В. Г. Кутяйкин ; под общей редакцией В. Н. Кайновой. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 500 с.

Гладкова О.И.
студент
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва,
Россия, Рыбинск
ksushag1102@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАБОТНИКА ОТК НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Аннотация. В статье рассмотрены направления внедрения высоких технологий в деятельность работника отдела технического контроля на современном промышленном предприятии. Особое внимание уделено тому, что цифровизация отдела технического контроля (ОТК) должна восприниматься не как отдельное новое явление, а как естественное продолжение традиционных задач, связанных с техническим контролем. Это включает в себя предотвращение дефектов, подтверждение соответствия продукции конструкторским и нормативным требованиям, обеспечение прослеживаемости результатов контроля и испытаний, а также участие в корректирующих и предупреждающих мерах.

Ключевые слова: Отдел технического контроля, контроль качества, цифровизация производства, испытания готовой продукции, климатические камеры, машинное зрение, прослеживаемость, измерительные системы, промышленное предприятие.

Gladkova O.I.
Student
Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov,
Russia, Rybinsk
ksushag1102@mail.ru

APPLICATION OF ADVANCED TECHNOLOGIES IN THE PROFESSIONAL ACTIVITY OF A QUALITY CONTROL DEPARTMENT EMPLOYEE AT AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Abstract. The article discusses the areas in which advanced technologies are being introduced into the work of a quality control department (QCD) at a modern enterprise, including enterprises in the aviation industry. It is noted that a QCD specialist's work is increasingly supported by digital tools that reduce the influence of the human factor and speed up inspection procedures. It is concluded that for a quality control department specialist to work effectively, it is necessary to master modern measurement and information technologies, since they are becoming an integral part of production quality control.

Keywords: quality control department, quality control, digital technologies, industrial enterprise, measuring instruments, human factor.

В современной промышленности отдел технического контроля является важнейшим элементом системы управления качеством продукции. На практике отдел технического контроля (ОТК) не только проверяет соответствие изделий установленным стандартам, но и играет ключевую роль в управлении производственными процессами. Через процедуры входного,

операционного и приемочного контроля служба качества обеспечивает соблюдение требований стандартов, технических условий, маршрутной технологии, конструкторской документации и договорных обязательств перед заказчиком [1 – 4].

Основные функции отдела технического контроля (ОТК) включают предотвращение выпуска дефектной продукции, выявление факторов, приводящих к браку, участие в анализе причин дефектов, документирование результатов проверок, сотрудничество с технологическими подразделениями и поддержание точности измерений. Иначе говоря, отдел технического контроля (ОТК) осуществляет свою деятельность не только на стадии финального пропуска готовой продукции, но и на протяжении всего производственного цикла, обеспечивая его непрерывное сопровождение, что помогает выявлять несоответствия на корню и более оперативно их устранять. Это оптимизирует время и ресурсы предприятия. Особенно заметно это на машиностроительных, приборостроительных, металлообрабатывающих и электротехнических предприятиях, где качество определяется совокупностью большого числа параметров, а отдельная ошибка может привести к возврату партии, рекламациям или отказу изделия в эксплуатации [1; 2; 3].

В традиционных производственных процессах сотрудники отдела технического контроля (ОТК) занимались визуальным осмотром, ручными измерениями, выборочным контролем, использованием калибров, шаблонов и измерительных инструментов, а также оформлением протоколов на бумажных носителях. Подобная модель до сих пор сохраняется на многих предприятиях регионального уровня, прежде всего в тех случаях, когда объемы выпуска невелики, номенклатура изделий часто меняется, а инвестиционные возможности ограничены. Однако даже в таких условиях требования к прослеживаемости, оперативности принятия решений и доказуемости результатов контроля заметно возросли [4; 5].

По этой причине разговор о внедрении высоких технологий в работу ОТК следует начинать не с самых сложных и дорогостоящих решений, а с понимания того, какие функции технического контроля цифровизация усиливает в первую очередь. Для работника ОТК важны не абстрактные инновации, а инструменты, которые позволяют быстрее обнаружить отклонение, точнее зафиксировать результат, надежнее сохранить данные и оперативнее передать информацию тем подразделениям, которые могут повлиять на процесс. Именно в таком прикладном смысле цифровые технологии становятся частью профессиональной деятельности контролера и инженера по качеству [5 – 7].

Наряду с этим в промышленности наблюдается рост популярности методов, основанных на принципах smart manufacturing, Industry 4.0 и Quality 4.0., Эти принципы реализуются посредством объединения измерительных инструментов, программных решений, анализа данных и производственных систем. Но, в контексте работы отдела технического контроля (ОТК) следует выделить следующее: несмотря на использование цифровых платформ,

ключевыми факторами остаются точность критериев приемки, метрологическое обеспечение контроля, стабильность процедур испытаний и компетентность специалиста, анализирующего результаты [13 – 18].

В последние годы тема цифровизации качества стала обсуждаться и в российской научной литературе. Авторы отмечают, что цифровая трансформация промышленных предприятий влияет не только на производительность, но и на характер управления качеством, структуру контроля и требования к персоналу [5; 6]. Но, также, для большинства промышленных предприятий представляют интерес не только высокоразвитые интеллектуальные системы, но и более доступные технологии, такие как: электронные карты контроля, датчики с цифровым выводом, программируемые камеры испытаний, локальные системы машинного зрения, трехмерные измерительные устройства, а также интеграция результатов контроля с корпоративными базами данных [7 – 12].

Особенно показательной является деятельность работника ОТК, связанная с испытаниями готовой продукции. Если при обычном измерительном контроле оцениваются размеры, геометрия, твердость, шероховатость или внешний вид, то испытания позволяют проверить, как изделие ведет себя в условиях, приближенных к эксплуатации. Речь идет о климатических, механических, вибрационных, электрических, ресурсных и функциональных испытаниях. Соответственно, именно здесь цифровизация дает наиболее наглядный эффект: режимы задаются программно, параметры среды и реакции изделия фиксируются автоматически, а результаты сохраняются в форме электронных протоколов и трендов [10 – 12].

Цель статьи состоит в том, чтобы показать, как высокие технологии применяются в профессиональной деятельности работника ОТК на промышленном предприятии, начиная от базовых функций технического контроля и заканчивая цифровизацией контроля и испытаний готовой продукции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить место и функции отдела технического контроля (ОТК) в системе управления качеством предприятия; изучить наиболее перспективные направления цифровизации работы сотрудников ОТК; проанализировать влияние цифровых технологий на процесс испытаний готовой продукции; оценить потенциал использования этих технологий не только на крупных высокотехнологичных предприятиях, но и на небольших региональных производствах.

Методологическую основу исследования составили анализ и систематизация учебной литературы по управлению качеством, публикаций по цифровизации промышленности, материалов о практическом применении машинного зрения, трехмерных измерительных систем, испытательного оборудования и цифровых средств регистрации результатов контроля [1 – 12]. Такой подход позволил соединить классическое понимание функций ОТК с современными тенденциями цифровой трансформации производства.

На первом этапе были изучены теоретические источники, раскрывающие сущность технического контроля на предприятии, его виды, задачи и место в системе менеджмента качества. Это было необходимо для того, чтобы рассматривать цифровизацию не как самостоятельное явление, а как развитие уже существующей практики входного, операционного, приемочного и инспекционного контроля [1 – 4].

На втором этапе проведен отбор публикаций, посвященных цифровизации производственных процессов и изменению функций служб качества. При анализе учитывались работы, в которых рассматриваются как общие управленческие эффекты цифровой трансформации, так и интеллектуальные системы контроля качества, применение компьютерного зрения, автоматизация измерений и современные средства регистрации параметров испытаний [5 – 9; 15 – 18].

На третьем этапе выполнено содержательное сопоставление технологий по критериям, значимым именно для практической работы ОТК: возможность внедрения на предприятии средней мощности, требования к подготовке персонала, стоимость организационных изменений, влияние на скорость оформления результатов, повышение повторяемости контроля, обеспечение прослеживаемости и пригодность для испытаний готовой продукции. Такой ракурс особенно важен, поскольку реальный выбор решений на региональном предприятии обычно определяется не модой на инновации, а сочетанием технической необходимости, экономической целесообразности и наличия кадров [6; 7; 10 – 12].

В работе применены методы сравнительного анализа, логического обобщения и экспертной интерпретации. Использование этих методов позволило выделить те технологические решения, которые действительно меняют повседневную деятельность работника ОТК, а не существуют лишь как демонстрация возможностей цифровой промышленности.

Проведенный анализ показывает, что цифровизация работы ОТК развивается поэтапно. На большинстве предприятий она начинается не с полного внедрения цифрового двойника или сложной предиктивной аналитики, а с более простых и практичных изменений: перевод журналов в электронный вид, использование цифровых штангенциркулей и микрометров с возможностью передачи данных, применение штрихкодов и QR-кодов для идентификации партий, интеграция результатов контроля с 1С, ERP, MES или внутренними базами предприятия. Уже на этом уровне снижается доля ручных ошибок при переписывании данных, ускоряется формирование отчетности и повышается прозрачность движения продукции между участками [5; 6; 13; 14].

Для работника ОТК такие изменения означают переход от простой фиксации результата к управлению информацией о качестве. Если раньше существенная часть времени уходила на оформление бумажных карт, поиск сопроводительной документации и сверку номеров партий, то теперь большее значение приобретают корректность ввода данных, соблюдение логики

цифрового маршрута изделия и контроль достоверности автоматически собранной информации. Следовательно, цифровизация не отменяет профессиональную роль контролера, а делает более значимыми его аккуратность, системность мышления и понимание нормативных требований.

Первое направление практической цифровизации связано с электронными средствами измерения и регистрацией результатов контроля. На предприятиях регионального уровня часто внедряются сравнительно доступные решения: цифровые индикаторы, твердомеры, толщиномеры, штангенинструмент с USB- или беспроводным интерфейсом, программные журналы несоответствий, электронные карты контроля. Их достоинство заключается в том, что они не требуют полной перестройки производства, но уже позволяют уменьшить число ошибок переписывания, ускорить статистическую обработку данных и обеспечить накопление истории измерений по изделию или партии [3 – 5].

Второе направление – локальные системы машинного зрения. На практике речь нередко идет не о сложных интеллектуальных комплексах корпоративного уровня, а о камерных системах для проверки маркировки, комплектности, цвета, геометрических контуров, состояния поверхности, наличия отверстий, фасок, уплотнений или правильности сборки. Такие решения особенно полезны на участках с повторяющимися однотипными операциями, где человеческий глаз быстро утомляется, а цена пропуска дефекта высока. Российские публикации и современные обзоры показывают, что машинное зрение постепенно выходит за рамки крупных предприятий и становится применимым в более компактных производственных контурах [7; 8; 16].

Для ОТК внедрение машинного зрения не означает полного отказа от человека. Работник ОТК по-прежнему определяет критерии браковки, проверяет корректность эталонных изображений, анализирует ложные срабатывания, оценивает чувствительность системы к освещению, загрязнению оптики и изменению положения изделия. Тем самым цифровое решение выполняет рутинную часть операций, а специалист сохраняет функцию инженерного и нормативного контроля.

Третье направление связано с развитием трехмерных измерительных систем и цифровой геометрической проверки изделий. В тех случаях, когда контроль сложной формы детали затруднен с помощью традиционных универсальных средств измерений, применяются координатно-измерительные машины, оптические сканеры и трехмерные измерительные комплексы. Их использование особенно оправдано в инструментальном производстве, приборостроении, машиностроении и при выпуске малосерийной продукции с повышенными требованиями к геометрии. Для работника ОТК важным преимуществом является не только точность измерения, но и получение цифровой модели отклонений, которую можно сопоставить с чертежом, архивировать и применять при разборе причин брака [9].

Четвертое направление – развитие прослеживаемости и цифрового архива качества. На предприятиях, где контроль и испытания ведутся по нескольким участкам, серьезной проблемой остается разрозненность данных: часть результатов хранится в бумажных журналах, часть – в файлах отдельных специалистов, часть – в памяти приборов. Цифровизация позволяет объединить эти сведения и сформировать единый след изделия: от входного контроля материала и комплектующих до итоговой приемки и испытаний готовой продукции. Для ОТК это особенно важно при расследовании рекламаций, анализе причин повторяющегося брака и подтверждении того, что партия прошла контроль в полном объеме [13; 14; 17].

Особое место в профессиональной деятельности работника ОТК занимает контроль и испытания готовой продукции. В отличие от операционного контроля, где оценивается отдельный размер, параметр или состояние поверхности, здесь проверяется работоспособность изделия, его устойчивость к внешним воздействиям и соответствие эксплуатационным требованиям. Именно поэтому участок испытаний часто становится той сферой, где цифровизация наиболее ощутимо влияет на качество, скорость и доказательность принимаемых решений.

Одним из наиболее распространенных средств испытаний на промышленных предприятиях являются климатические камеры. Они используются для проверки изделий, материалов, узлов и приборов при воздействии повышенных и пониженных температур, влажности, циклических изменений среды и других факторов. Современные публикации подчеркивают, что климатические камеры давно перестали быть исключительно лабораторным оборудованием для научных центров. Они широко применяются в электротехнике, приборостроении, производстве электронных компонентов, кабельной продукции, упаковки, полимерных материалов и во многих других отраслях [10; 12].

Для работника ОТК цифровизация климатических испытаний проявляется прежде всего в программируемом управлении режимами. Специалист задает цикл испытаний не вручную по отдельным операциям, а в форме программы, где фиксируются температура, влажность, время выдержки, число циклов, скорость перехода между режимами и условия остановки. Это обеспечивает повторяемость испытаний, уменьшает вероятность ошибки оператора и дает возможность воспроизводить один и тот же режим при повторной проверке или арбитражном испытании. Кроме того, современные камеры позволяют автоматически записывать фактические параметры среды, а значит, ОТК получает не только итоговое заключение, но и цифровой журнал прохождения испытания [10; 12].

Не менее важны цифровые средства при механических и ресурсных испытаниях. Универсальные испытательные машины, стенды на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, а также специализированные стенды для функциональной проверки изделий все чаще оснащаются датчиками усилия, пере-

мещения, деформации и программным обеспечением, которое автоматически строит диаграммы, рассчитывает характеристики, сохраняет протоколы и архивирует кривые испытаний. Для работника ОТК это означает переход от ручной записи единичных показаний к анализу полной кривой процесса. В результате появляется возможность глубже оценивать момент потери устойчивости, предел прочности, характер разрушения образца и воспроизводимость результатов между партиями.

В условиях регионального предприятия особенно ценными оказываются решения по модернизации уже имеющегося испытательного оборудования. На практике это может быть оснащение действующей машины электронным блоком сбора данных, выносом показаний на компьютер, программой автоматического расчета параметров, системой печати протоколов и архивирования результатов. Такой подход позволяет получить заметный эффект без закупки полностью новой лаборатории, а значит, является более реалистичным для предприятий со средним бюджетом [11; 12].

Вибрационные и ударные испытания также постепенно переходят в цифровой формат. Даже если предприятие не располагает самым современным стендом, цифровые контроллеры и системы регистрации позволяют точнее поддерживать заданные режимы, фиксировать ускорения и частоты, записывать историю испытаний и сравнивать поведение изделий разных партий. Для ОТК это важно потому, что оценка результатов становится не субъективной, а опирается на массив численных данных, пригодных для последующего анализа и предъявления заказчику.

Отдельного внимания заслуживает цифровизация электрических и функциональных испытаний готовой продукции. На предприятиях, выпускающих приборы, блоки, кабельную продукцию, электротехнические изделия и комплектующие, широко применяются автоматизированные стенды, которые проверяют параметры по заданному сценарию, сохраняют результаты в базе, формируют протокол с привязкой к серийному номеру изделия и позволяют быстро выявлять повторяющиеся отказы. Здесь работник ОТК выполняет уже не только функцию наблюдателя, но и функцию оператора цифровой испытательной среды, контролирующего корректность программы испытаний, состояние измерительных каналов и обоснованность критерия годности.

Практика показывает, что особенно полезной цифровизация испытаний оказывается при работе с серийной продукцией. Если изделие проходит несколько обязательных проверок подряд, то ручное оформление каждой операции замедляет выпуск и создает риск потери данных. При электронном сопровождении испытаний результаты автоматически связываются с конкретным изделием, что облегчает приемку, повторную проверку, расследование рекламаций и внутренний аудит. Для предприятий регионального значения это важно еще и потому, что нередко один специалист совмещает функции контролера, испытателя и оформителя документации. Цифровые

инструменты в таком случае реально разгружают персонал и снижают вероятность пропуска ошибки.

Вместе с тем цифровизация испытаний предъявляет дополнительные требования к ОТК. Во-первых, необходимо обеспечивать метрологическую надежность средств измерения и датчиков. Во-вторых, требуется защищать данные от потерь и подмены, особенно если они используются как доказательство соответствия продукции требованиям договора или стандарта. В-третьих, нужно поддерживать единообразие электронных протоколов, чтобы результаты разных участков были сопоставимы между собой. Следовательно, внедрение цифровых технологий без пересмотра регламентов и инструкций не даст полного эффекта [13; 14].

Существенный интерес для деятельности ОТК представляет и применение аналитических систем более высокого уровня. Речь идет об обработке массивов данных контроля, построении статистических зависимостей, выявлении отклонений по партиям, анализе причин повторяющегося брака и использовании элементов предиктивной аналитики. Однако на практике для большинства предприятий этот уровень цифровизации становится реальным лишь после того, как налажен базовый сбор качественных данных. Иначе цифровая оболочка скрывает старые проблемы – неполноту измерений, нестабильность критериев приемки и разрывы в прослеживаемости.

Поэтому для промышленного предприятия регионального масштаба наиболее рациональной представляется поэтапная модель внедрения. На первом этапе – оцифровка документации, электронные журналы, маркировка изделий, подключение измерительных приборов и программная регистрация испытаний. На втором этапе – внедрение локальных систем машинного зрения, модернизация испытательных стендов, расширение цифрового архива и статистический анализ данных. На третьем этапе – интеграция с ERP или MES, использование продвинутой аналитики, цифровых моделей и элементов интеллектуального управления качеством [5 – 9; 15 – 18].

Проведенный анализ позволяет сделать еще один важный вывод. Высокие технологии в ОТК эффективны тогда, когда они встроены в реальную производственную логику. Если предприятие закупает камеру, стенд или программный модуль, но не меняет процедуры идентификации образцов, порядок допуска к испытаниям, правила архивирования и анализа результатов, цифровой эффект оказывается ограниченным. Напротив, даже сравнительно простые решения дают значимый результат, если они последовательно поддерживают повседневную работу работника ОТК и уменьшают разрыв между контролем, испытанием и управленческим решением.

Наконец, изменение технологической базы неизбежно влияет на профессиональный профиль специалиста ОТК. Сегодня от него требуется не только умение пользоваться мерительным инструментом и знать нормативную документацию, но и способность работать с программным интерфейсом оборудования, понимать логику цифрового протокола, анализировать графики и тренды, проверять корректность данных и взаимодействовать с

технологами, метрологами, ИТ-специалистами и испытательным персоналом. Таким образом, цифровизация не упрощает профессию, а делает ее более комплексной и ответственной.

Таким образом, применение высоких технологий в профессиональной деятельности работника ОТК следует рассматривать как развитие классических функций технического контроля, а не как их замену. ОТК по-прежнему отвечает за предупреждение брака, подтверждение соответствия продукции установленным требованиям, участие в анализе причин дефектов и обеспечение прослеживаемости результатов контроля. Однако цифровые технологии позволяют выполнять эти задачи быстрее, точнее и с большей доказательностью.

Наиболее реалистичными для широкого круга промышленных предприятий являются решения, которые соединяют доступность и практическую отдачу: электронные карты контроля, цифровые измерительные приборы, локальные системы машинного зрения, трехмерные измерительные комплексы, программируемые климатические камеры, модернизированные испытательные стенды, автоматическое формирование протоколов и единый цифровой архив результатов. Именно такие инструменты способны заметно повысить качество работы ОТК не только на крупных инновационных площадках, но и на предприятиях регионального значения.

Особую значимость цифровизация приобретает в сфере испытаний готовой продукции. Программное управление режимами, автоматическая регистрация параметров, привязка результатов к конкретному изделию и накопление истории испытаний делают деятельность работника ОТК более устойчивой к случайным ошибкам и повышают достоверность итоговой приемки. При этом решающим условием остается грамотное сочетание техники, регламентов, метрологического обеспечения и профессиональной подготовки персонала.

Следовательно, перспективы развития ОТК связаны не столько с внедрением отдельных модных технологий, сколько с формированием целостной цифровой среды контроля и испытаний, в которой специалист по качеству сохраняет ключевую экспертную роль. Чем выше степень автоматизации предприятия, тем важнее способность работника ОТК критически оценивать данные, обеспечивать корректность процедур и связывать результаты контроля с реальными управленческими действиями.

Список литературы

1. Пономарев С. В., Мищенко С. В., Белобрагин В. Я. и др. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: учебное пособие. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.

2. Хисамова Э. Д., Зайнутдинова Э. Э. Обеспечение качества продукции: учебник. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2018. – 170 с.

3. Цой Г. А. Управление качеством продукции: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 157 с.

4. Шевчук Д. А. Управление качеством: учебное пособие. – М.: ГроссМедиа, 2008. – 216 с.
5. Василенкова Н. В. Управление качеством в условиях цифровизации промышленности // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2021. – № 6. – С. 45 – 50,
6. Овчинников С. О. Цифровизация контроллинга как приоритетное направление развития системы управления промышленным предприятием // Московский экономический журнал. – 2024. – № 6.
7. Кузовкин Д. А. Модель цифровой трансформации промышленных предприятий через внедрение интеллектуальных систем контроля качества // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2025. – № 7.
8. Ташкин М. Ю. Применение компьютерного зрения на производстве // Матрица научного познания. – 2025. – № 5.
9. Буклагин Д. С. Трехмерные измерительные системы и возможность их применения в промышленности // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 1(67).
10. Югай А. Э. Климатические камеры: принципы работы, классификация и современные области применения // Мировая наука. – 2025. – № 12(105).
11. Егорова А. А. Анализ оборудования для испытаний радиопродукции на устойчивость к воздействию внешних факторов // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 8.
12. Климатические испытательные камеры «НПФ Технология» // ИСУП. – 2021. – № 1. – С. 92 – 95.
13. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2015.
14. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015.
15. NIST. Smart Manufacturing [Электронный ресурс]. URL: https://www.nist.gov/smart-manufacturing (дата обращения: 17.03.2026).
16. ASQ. Quality 4.0 [Электронный ресурс]. URL: https://asq.org/quality-resources/quality-4-0 (дата обращения: 17.03.2026).
17. Siemens. Quality control [Электронный ресурс]. URL: https://www.siemens.com/en-us/technology/quality-control/ (дата обращения: 17.03.2026).
18. Siemens. Digital Twin [Электронный ресурс]. URL: https://www.siemens.com/en-us/technology/digital-twin/ (дата обращения: 17.03.2026).

Титов Д.С.
аспирант
МГТУ имени Н.Э. Баумана
Россия, Москва
titovds@student.bmstu.ru
Постникова Е.С.
к.т.н., доцент кафедры «Организация производства1
МГТУ имени Н.Э. Баумана
Россия, Москва
postnikova.el@bmstu.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможностей применения систем искусственного интеллекта, в частности больших языковых моделей, для поддержки экспертной оценки в рамках метода анализа иерархий при решении задач управления качеством в контексте формирования интегрированных производственных систем. Рассмотрены принципиальные различия между оценками, формируемыми человеком-экспертом и ИИ-системой. Предложена концепция гибридного подхода, при котором ИИ и эксперт применяются совместно. Показана применимость гибридного подхода к задачам многокритериального отбора оборудования и участников интегрированных производственных структур. Обсуждаются ограничения и перспективы использования ИИ в процессах цифровизации управления качеством на производственных предприятиях.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, искусственный интеллект, большие языковые модели, LLM, экспертные оценки, многокритериальное принятие решений, управление качеством, интегрированные производственные системы.

Titov D.S.
Postgraduate Student
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
titovds@student.bmstu.ru
Postnikova E.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Production Organization
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
postnikova.el@bmstu.ru

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN QUALITY MANAGEMENT FOR THE FORMATION OF INTEGRATED PRODUCTION SYSTEMS

Abstract. The article is devoted to exploring the possibilities of using artificial intelligence systems, in particular large language models, to support expert judgment within the Analytic Hierarchy Process when solving quality management problems in the context of forming integrated production systems. The fundamental differences between assessments provided by a human expert and by an AI system are considered. A hybrid approach is proposed in which AI and the expert are used jointly. The applicability of the hybrid approach to multicriteria

selection of equipment and participants of integrated production structures is demonstrated. The limitations and prospects of using AI in the digitalization of quality management processes at industrial enterprises are discussed.

Keywords: analytic hierarchy process, artificial intelligence, large language models, LLM, expert judgments, multicriteria decision-making, quality management, integrated production systems.

Цифровизация процессов управления качеством является одной из ключевых задач современного промышленного производства. Это касается и предприятий ракетно-космической отрасли (РКО), производящих технически сложную продукцию с жёсткими требованиями к качеству обработки деталей. В условиях ограниченного доступа к высокотехнологичному оборудованию ряд предприятий обращается к аутсорсингу и производственной кооперации, формируя интегрированные производственные системы (ИПС). Оба эти процесса – и отбор оборудования внутри предприятия, и выбор участников по интеграции – по своей природе являются задачами многокритериального принятия решений [1, 2, 3].

Для решения таких задач широко применяется метод анализа иерархий (МАИ), разработанный Т. Саати и позволяющий структурировать сложные решения через последовательную попарную оценку критериев [4]. Центральным элементов МАИ являются попарные сравнения, выполняемые экспертами, и именно качество полученных суждений, вносимых в матрицы попарных сравнений, определяет надёжность итогового решения [5].

На практике проведение полноценного экспертного опроса в рамках МАИ бывает сопряжено с рядом трудностей, связанных с дефицитом квалифицированных узкоспециализированных экспертов, временными и организационными затратами на проведение опроса, а также неизбежной субъективностью индивидуальных суждений. При увеличении числа сравниваемых критериев количество попарных сравнений растёт по квадратичному закону, что создаёт значительную нагрузку на эксперта и повышает риск логических противоречий в матрицах [5, 6].

В последние годы стремительное развитие генеративного ИИ и больших языковых моделей (LLM) открыло новые возможности для автоматизированной поддержки экспертной оценки. Ряд исследований уже рассматривает LLM как «виртуальных экспертов», способных формировать матрицы попарных сравнений на основе обобщённых знаний из открытых источников [7, 8, 9, 10]. В рамках настоящей работы анализируются природа оценок, предоставляемых человеком-экспертом и ИИ, сопоставляются их преимущества и ограничения, и предлагается гибридный подход, применимый к задачам управления качеством в ИПС.

Задачи управления качеством при формировании ИПС

Предприятия РКО работают в условиях высоких требований к качеству готовых изделий и ограниченных производственных возможностей. Санк-

ционное давление и сложности с приобретением высокоточного оборудования усиливают интерес к кооперации – формированию ИПС, в рамках которых задачи обработки деталей распределяются между несколькими участниками [1, 2, 11].

В контексте обеспечения качества изделий в рамках ИПС необходимо решить две задачи. На первом этапе решается задача выбора оборудования внутри предприятий – необходимо отобрать станки, обеспечивающие заданное качество обработки деталей и производительность с учётом их технических характеристик, фактического состояния и экономических параметров [1]. На втором этапе – сформировать рациональный набор участников ИПС, оценивая их производственные возможности, надёжность, опыт и консолидированные риски взаимодействия [2].

Обе задачи формально могут быть представлены как многокритериальные задачи выбора, в которых задано множество альтернатив $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_n\}$ – единиц оборудования или кандидатов. Требуется выбрать альтернативу a*, максимизирующую интегральный показатель эффективности:

$$a^* = argmax\, J(a_i) = argmax \sum W_j * \overline{k_{ij}}$$

где W_j – весовые коэффициенты критериев,

$\overline{k_{ij}}$ – нормированные значения показателей, приведённые к безразмерной шкале [0; 1].

Для задачи выбора оборудования в качестве основных критериев оценки выделены: качество обработки, производительность, экономичность использования и состояние технологической системы [1, 12]. При отборе кандидатов в ИПС критериями верхнего уровня являются производительность кандидата, экономическая эффективность, качество продукции, опыт кандидата и консолидированный уровень риска [2].

В обоих случаях параметры не поддаются прямому количественному измерению и требуют экспертного суждения, что говорит о возможности применения МАИ. Однако здесь помехой является практическое ограничение метода – надёжность результатов полностью определяется качеством вносимых экспертных оценок.

МАИ структурирует задачи принятия решений через иерархию уровней, на верхнем уровне расположена цель сравнений, далее идут критерии, подкритерии и альтернативы. На каждом уровне элементы попарно сравниваются относительно элемента вышестоящего уровня с использованием девятибалльной шкалы Саати. Из матриц попарных сравнений путём нормализации геометрического среднего строк вычисляются относительные веса (приоритеты) элементов [4, 5].

Обязательным условием является проверка согласованности суждений, отношение согласованности (CR) как правило не должно превышать 10%. Превышение этого порога свидетельствует о логических противоречиях в

матрице и требует пересмотра оценок. Как показывает практика, соблюдение данного условия может представлять значительную трудность, в исследовании [5] из 21 эксперта, привлечённого к опросу, 8 (38%) изначально продемонстрировали CR выше допустимого порога – от 10,2% до 22,7%.

Это подчёркивает, что качество человеческих оценок в рамках МАИ может быть нестабильным и существенно зависит от компетентности и внимательности экспертов. Надёжность результатов определяется не только структурой иерархии, но и качеством входных данных – экспертных суждений.

Эксперт и ИИ как источники оценок

Специалист-эксперт обладает рядом принципиальных преимуществ при формировании оценок в рамках МАИ. Прежде всего, специалист, работающий на конкретном предприятии, учитывает технологические нюансы производства, накопленную статистику отказов оборудования и неформализованный опыт. Такое знание носит «молчаливый» характер [6] – оно не зафиксировано в открытых источниках и недоступно автоматизированной системе.

Вместе с тем экспертные суждения подвержены когнитивным искажениям. Среди них – эффект якоря (первое воспринятое значение неоправданно влияет на последующие оценки), предвзятость подтверждения и ошибка доступности. При большом числе критериев когнитивная нагрузка приводит к снижению качества сравнений. При групповой работе также возникает риск «группового мышления» – подавления независимых мнений в пользу доминирующей точки зрения [10, 13].

Большие языковые модели формируют оценки иным образом, их «знание» представляет собой статистическое обобщение огромных массивов публично доступных текстов: научных статей, технических стандартов, отраслевых отчётов. ИИ не обладает ни опытом, ни пониманием в человеческом смысле, однако способен сформировать «усреднённую позицию» профессионального сообщества по тому или иному вопросу [8, 10].

К ключевым преимуществам ИИ при выполнении попарных сравнений в МАИ относятся:

- воспроизводимость: при фиксированных параметрах запроса модель даёт стабильные результаты, которые можно проверить и повторить;

- скорость и доступность: полную матрицу попарных сравнений для иерархии из 15–20 критериев ИИ формирует за секунды, тогда как организация экспертного опроса может занять недели;

- математическая согласованность: исследования показывают, что LLM, как правило, демонстрируют высокую внутреннюю согласованность – значения CR у трёх тестируемых моделей составили 0,031; 0,061 и 0,022, что значительно ниже порогового значения 0,1 [10];

- гибкость: ИИ может сформировать несколько вариантов весов приоритетов в зависимости от постановки задачи или заданного «профиля эксперта» [9].

К ограничениям ИИ-систем относятся: отсутствие доступа к внутренней информации, неспособность учесть уникальный производственный контекст конкретного предприятия, риск «галлюцинаций» – уверенных, но фактически ошибочных ответов – в области, слабо представленной в обучающих данных. Существенную роль играют систематические смещения: в режиме прямого попарного сравнения LLM склонны отдавать предпочтение внешне более «весомым» ответам, что обозначается как «эффект сравнительной ловушки» [10, 14].

Гибридный подход ИИ и эксперт

Проведённый анализ показывает, что ни специалист-эксперт, ни ИИ не обладают однозначным преимуществом при формировании оценок в МАИ. Решением является применение гибридного подхода, при котором оба источника оценок взаимодополняют друг друга. Ключевой принцип: ИИ берёт на себя функции, требующие широты охвата и воспроизводимости, тогда как эксперт обеспечивает глубину понимания специфического контекста и несёт ответственность за итоговое решение [15].

Можно выделить несколько основных вариантов организации гибридного подхода:

- последовательная схема – ИИ самостоятельно формирует начальную матрицу попарных сравнений на основе общедоступных данных; эксперт проверяет результат и вносит поправки с учётом специфики производства;
- пногосценарный анализ – LLM создаёт несколько наборов весов приоритетов в зависимости от акцента (качество обработки, производительность, экономические параметры); эксперт выбирает наиболее подходящий сценарий и при необходимости корректирует его;
- верификация согласованности – автоматизированный инструмент выявляет логические противоречия в ответах экспертов (при CR > 10%) и предлагает незначительные корректировки без существенного изменения общей логики ответа [15];
- многоагентный ИИ – несколько моделей параллельно и независимо формируют оценки, которые затем агрегируются через геометрическое среднее – имитируя работу экспертной комиссии без логистических затрат [9, 10].

Для объединения оценок эксперта и ИИ может применяться взвешенная гибридизация по следующей формуле:

$$W_{\text{final}} = \alpha \cdot W_{\text{obj}} + (1 - \alpha) \cdot W_{\text{subj}}$$

где W_{obj} – объективные веса, рассчитанные на основе данных;

W_{subj} – субъективные веса, сформированные экспертом или ИИ;

$\alpha \in [0, 1]$ – параметр, регулирующий баланс между объективными данными и экспертными предпочтениями.

Исследования показывают, что при варьировании α в диапазоне 0,3–0,7 итоговый рейтинг альтернатив, как правило, сохраняется стабильным, что свидетельствует о робастности подхода [8].

Применение гибридного подхода к задачам управления качеством в ИПС

Рассмотрим, как гибридный подход может быть применён к двум конкретным задачам управления качеством: отбору оборудования с ЧПУ и выбору участников в ИПС.

В рамках задачи отбора фрезерных станков с ЧПУ для предприятий РКО была построена иерархия из пяти уровней, включающая четыре критерия верхнего уровня: качество обработки, производительность, экономичность и состояние технологической системы [1]. Эти критерии декомпозированы на подкритерии, среди которых: точность позиционирования, повторяемость, максимальная скорость вращения шпинделя, время смены инструмента, надёжность оборудования, стоимость обслуживания и ряд других. Экспертные оценки для сравнения пяти реальных моделей станков были получены от специалистов предприятий ракетно-космической отрасли. Результаты показали приоритетность точности позиционирования, повторяемости и количества дефектов, выявляемых в ходе выходного контроля.

При рассмотрении данной задачи с позиций гибридного подхода ИИ может взять на себя вспомогательные функции на нескольких этапах. На этапе построения иерархии – систематизировать актуальные технические стандарты (ГОСТ, ISO) и отраслевые исследования для обоснования набора критериев. На этапе формирования первичных весов – сформировать «базовую матрицу» предпочтений на основе обобщённого мнения исследовательского сообщества и публично доступных сравнительных испытаний оборудования. На этапе оценки альтернатив – при загрузке в модель технических паспортов станков – структурировать первичное сопоставление по ключевым техническим параметрам. Эксперт при этом вносит коррективы на основе данных, недоступных ИИ: накопленной статистики дефектов на конкретном предприятии, сведений о фактическом состоянии оборудования после ремонтов, особенностей производственной программы.

Для задачи отбора кандидатов в состав ИПС авторами была разработана пятиуровневая иерархия с критериями производительности, экономической эффективности, качества продукции, опыта кандидата и консолидированных рисков [2]. В иерархию включены около 20 подкритериев, среди которых производственная мощность, загруженность оборудования, возможность встраивания в план производства, риск срыва поставок, риск утечки информации, качество материала и другие. Результаты экспертной оценки показали, что наибольший вес получил критерий качества продукции (53,5%), на второй позиции – производительность (19,4%), на третьей – консолидированный уровень риска (15,8%). Внутри категории качества доминирующей оказалась способность оборудования участника обеспечить эффективное производство.

ИИ в этой задаче может дополнить экспертные оценки данными из открытого доступа: финансовая устойчивость кандидата, репутационные

риски, соответствие оборудования международным стандартам. Кроме того, ИИ позволяет быстро сформировать несколько вариантов весов критериев под разные стратегии формирования ИПС – например, ориентированной на минимизацию рисков или на максимизацию производительности – и передать выбор сценария на усмотрение экспертов предприятия.

Таким образом, оба прикладных примера иллюстрируют ключевой принцип гибридного подхода – расширение охвата и повышение воспроизводимости оценок с помощью ИИ там, где доступны открытые данные, при сохранении роли эксперта в обеспечении точности и релевантности там, где требуется погружение в специфический контекст.

Несмотря на потенциал ИИ, использование его в рамках МАИ для задач управления качеством сопряжено с рядом проблем. Суждения LLM иногда трудно интерпретировать, модель даёт числовую оценку, но её обоснование может быть поверхностным или некорректным, что создаёт проблему верифицируемости результатов [8]. При обращении к узкоспециализированным темам, например к характеристикам конкретной модели станка, слабо представленной в интернете, ИИ может уверенно формировать фактически ошибочные суждения.

Качество матриц попарных сравнений, генерируемых ИИ, существенно зависит от того, насколько точно сформулирован запрос к модели. Разработка стандартизированных шаблонов запросов для задач МАИ является самостоятельной методологической задачей [15]. Знания ИИ ограничены датой обучения модели и публично доступными источниками, поэтому для быстро меняющихся рыночных или технологических ситуаций актуальность агрегированной «экспертизы» требует дополнительной проверки.

Особую остроту в производственных структурах с высокими требованиями к надёжности и качеству приобретает вопрос ответственности за решения, принятые при участии ИИ. В РКО, где цена ошибки особенно высока, ИИ должен рассматриваться исключительно как инструмент поддержки, а не замены экспертного суждения.

Перспективными направлениями дальнейших исследований представляются: проведение сравнительных экспериментов «ИИ vs. эксперт» на реальных производственных задачах с верификацией результатов по известным исходам; разработка специализированных промпт-шаблонов для МАИ-оценок в промышленном контексте; интеграция ИИ-агентов непосредственно в программные инструменты типа AHP-OS; развитие многоагентных схем с механизмами контроля согласованности [6].

Проведённое исследование показывает, что ИИ и специалист-эксперт не конкурируют, а взаимодополняют друг друга при формировании оценок в рамках МАИ. Эксперт незаменим там, где требуется глубокое понимание специфического производственного контекста, накопленный практический опыт и учёт неформализованных факторов. ИИ, в свою очередь, предостав-

ляет агрегированную «базовую экспертизу» из открытых источников, обеспечивает высокую воспроизводимость и согласованность оценок, а также позволяет быстро генерировать несколько сценариев в зависимости от постановки задачи.

Гибридный подход, предложенный в настоящей работе, открывает практические возможности для цифровизации управления качеством, в том числе снижения трудоёмкости экспертного опроса, уменьшения влияния когнитивных искажений и обеспечения большей прозрачности процесса формирования весов критериев. Это особенно актуально для задач отбора оборудования и участников интеграции, где иерархии содержат значительное число критериев и требуют привлечения высококвалифицированных специалистов.

Показана применимость подхода к двум конкретным задачам: рациональному выбору фрезерных станков с ЧПУ для предприятий ракетно-космической отрасли и отбору кандидатов в состав интегрированных производственных систем. В обоих случаях ИИ способен ускорить и формализовать начальный этап оценивания, тогда как итоговая ответственность за принятое решение остаётся за экспертом. Сочетание этих двух источников оценок является перспективным направлением цифровизации процессов управления качеством на производственных предприятиях.

Данное исследование было проведено в рамках работы
по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта
на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям
научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от 23 апреля 2024 г.

Список литературы

1. Постникова Е.С., Титов Д.С. Рациональный выбор оборудования с ЧПУ для предприятий ракетно-космической отрасли // Пятнадцатые Чарновские Чтения. Сборник трудов XV Всероссийской научной конференции по организации производства. Москва, 5 декабря 2025 г. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, НП «Объединение контроллеров», 2025. С. 417–428.

2. Титов Д.С., Постникова Е.С., Александрова С.В., Постников А.В. Рациональный выбор участников интегрированной производственной системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2026. № 1. С. 82–91.

3. Постникова Е.С., Ставровский М.Е. Повышение уровня технологичности конструкций изделий машиностроения – фактор обеспечения их конкурентоспособности // Инновации в менеджменте. 2022. № 4(34). С. 48–53.

4. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill, 1980, 287 p.

5. Saaty T.L. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83–98.

6. Goepel K.D. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS) // International Journal of the Analytic Hierarchy Process. 2018. Vol. 10, No. 3. P. 469–487.

7. Klymenko M., Fedorka P. Adjustment of the analytic hierarchy process indicators using AI tools // Information Technologies and Computer Engineering. 2025. Vol. 22, No. 1. P. 103–114.

8. Frish S., Talmor I., Hadar O., Shoshany M., Shapira A. Enhancing consistency of AHP-based expert judgements: A new approach and its implementation in an interactive tool // MethodsX. 2025. Vol. 14. 103341.

9. Svoboda I., Lande D. Enhancing multi-criteria decision analysis with AI: Integrating Analytic Hierarchy Process and GPT-4 for automated decision support // arXiv. 2024. arXiv:2402.07404 [cs.AI].

10. Lu X., Li J., Takeuchi K., Kashima H. AHP-Powered LLM Reasoning for Multi-Criteria Evaluation of Open-Ended Responses // Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2024. P. 1–16.

11. Постникова Е.С., Ставровский М.Е. Проектирование интегрированных производственных структур для обеспечения технологичности конструкции изделий машиностроения // Инновации в менеджменте. 2023. № 3 (37). С. 50–58.

12. Мазурин Э.Б., Савенко Е.В. Механизм выбора оборудования для различных типов производства // Омский научный вестник. 2022. № 1(181). С. 19–24.

13. Musbah J., Badi I. LLM-Assisted Virtual Expert Weight Elicitation in Pharmaceutical Supply Chains: A Z-Number Multi-Agent Framework // Intelligent Systems Research and Applications Journal. 2026. Vol. 2. P. 27–39.

14. Wu H., Zhou S., Zhang H., Chen W. Doc2AHP: Inferring Structured Multi-Criteria Decision Models via Semantic Trees with LLMs // arXiv. 2026. arXiv:2601.16479 [cs.AI].

15. Jeong H., Park C., Hong J., Lee H., Choo J. The Comparative Trap: Pairwise Comparisons Amplifies Biased Preferences of LLM Evaluators // Proceedings of the 8th BlackboxNLP Workshop. Suzhou, China: Association for Computational Linguistics, 2025. P. 79–108.

Авдеева М.Н.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
avdeeva.margot@gmail.com
Петухов С.Л.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
p_sl@bk.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ SHAP И LIME К РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ RANDOM FOREST ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН ОБНАРУЖЕНИЯ ЛОЖНЫХ ДЕФЕКТОВ

Аннотация. Современное производство телекоммуникационных приборов, таких как коммутаторы и маршрутизаторы требует постоянного и непрерывного улучшения методов прогнозирования и обнаружения дефектной продукции. Целью данной работы является рассмотрение возможных методов повышения эффективности работы автоматизированной оптической инспекции на производстве телекоммуникационного оборудования. Повышение эффективности будет обеспечено подбором методов анализа, которые способны интерпретировать прогнозы модели Random Forest.

Ключевые слова: машинное обучение, Random Forest, AOI, SHAP, LIME, ложные дефекты.

Avdeeva M.N.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
avdeeva.margot@gmail.com
Petukhov S.L.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
p_sl@bk.ru

APPLICATION OF SHAP AND LIME METHODS TO THE RESULTS OF RANDOM FOREST FORECASTING TO IDENTIFY THE CAUSES OF FALSE DEFECT DETECTION

Abstract. The modern manufacturing of telecommunications equipment, such as switches and routers, requires the continuous improvement of methods for predicting and detecting defective products. This study aims to examine potential methods for enhancing the efficiency of automated optical inspection in telecommunications equipment manufacturing. This efficiency improvement will be achieved by selecting analysis methods capable of interpreting predictions generated by Random Forest models.

Keywords: machine learning, Random Forest, AOI, SHAP, LIME, false defects.

С каждым годом операторы связи предъявляют все более высокие требования к качеству телекоммуникационной продукции. От поставляемой продукции ожидают стабильность характеристик, высокую надежность и длительный срок службы. Производители оборудования связи должны не только удовлетворять данным требованиям, но и работать в условиях жесткой ценовой конкуренции и проактивно адаптироваться к измененяем номенклатуры комплектующих и готовых изделий. Ключевой задачей в обеспечении всех требуемых характеристик является операция автоматизированной пайки.

Современные производители телекоммуникационного оборудования активно внедряют технологию AOI совмещенную с методами машинного обучения. Но несмотря на высокую точность прогнозирования дефектов пайки, результаты работы таких моделей остаются бинарными, относя исследуемые устройства либо к дефектным, либо к годным. Результаты работы модели не поддаются интерпретации со стороны оператора AOI. При выявлении дефектной продукции, оператору необходимо проводить дополнительный контроль платы на выявления типа несоответствия, что снижает скорость работы производства и увеличивает цену ошибки.

Для увеличения прозрачности результатов работы, полученных от модели прогнозирования в данной работе, были применены методы SHAP для глобальной интерпретации модели и LIME для локальной интерпретации отдельных классификаций.

Для определения оценки практической эффективности внедрения данных методов интерпретации будут проанализированы следующие аспекты: частота ложных срабатываний и время диагностики до и после введения методов. Также будет рассмотрена работа с корневыми причинами дефектов

Перед внедрением новых методов интерпретации данных были рассчитаны метрики качества классификаций. Модель Random Forest обеспечивает высокую способность прогнозирования возникновения дефектов.

Таблица

Метрики эффективности метода «Random Forest»

Метод	Точность	Полнота	F1-мерка	AUC-ROC
Random Forest	0,97	0,92	0,94	0,96

Для расчёта прогнозирования были собраны данные: геометрические параметры, параметры паяного соединения, отсутствие компонентов, неправильный компонент, повреждение компонента. Количество печатных плат в выборке – 10 000шт.

Введение метода SHAP позволило выявить 11 параметров, оказывающих влияние на предсказание дефектности устройства [1,3].

Контрастность паяного соединения – 0,281

Отклонение от шаблона – 0,218

Заполнение припоем – 0,149

Порог яркости дефекта – 0,148

Вибрация стола – 0,087

Градиент на границе выводов – 0,059

Визуальные шумы камеры – 0,041

Температура платы – 0,033

Время экспозиции – 0,021

Индекс повторяемости и калибровки – 0,014

Угол структурированной подсветки – 0,012

Из представленных данных можно сделать следующие выводы:

Наибольшее влияние имеют признаки контрастности паяного соединения, отклонение от эталонного шаблона и коэффициент заполнения припоем.

Также можно заметить, что значительное влияние на прогнозирование дефекта оказывают параметры, связанные с состоянием оборудования. Для устранения влияния этих факторов, была введена практика регулярного технического обслуживания.

Были выявлены параметры, влияние которых незначительно, эти параметры можно исключить из модели и их отсутствие при расчете прогноза не повлечет потерь в качестве.

В ходе проведения анализа результатов внедрения метода SHAP была обнаружена нелинейная зависимость параметров порога яркости дефекта и температуры платы. При нагревании плата расширяется и, следовательно, появляется небольшой размыв геометрии контактов. Это так же становится причиной выявления ложного дефекта. Для избежания дальнейшего влияния этого взаимодействия в параметры метода прогнозирования была добавлена температурная компенсация (при нагреве платы, порог яркости дефекта автоматически снижается).

Для внедрения метода LIME были отобраны две характерные платы одна с ложным дефектом и одна с реальным дефектом, выявленные на тестовой выборке.

Плата №1156 – модель ошибочно признала плату дефектной.

Плата №1174 – модель верно признала плату дефектной, но присвоила низкую вероятность дефекта.

Модель присвоила плате №1156 высокую вероятность дефекта – 0,78. При рассмотрении этого кейса удалось выяснить, что основную долю вероятности составляли признаки Вибрация рабочего стола – 0,39 и Визуальные шумы камеры – 0,33. Коренной причиной данных дефектов было признана зазор в креплении камеры. После проведения дополнительной наладки оборудования количество ложных дефектов сократилось на 17%.

Модель присвоила плате №1174 довольно низкую вероятность дефекта – 0,51. Наиболее весомыми параметрами для признания платы дефектной были – Градиент на границе пайки – 0,27 и Заполнение припоем – 0,19. Проведя анализ, удалось выяснить, что данный дефект возникает из-за неправильно подобранного трафарета для нанесения паяльной пасты [2]. Исправление данного несоответствия уменьшило вероятность возникновения непропая, что потенциально увеличивает срок службы устройств и предотвращает проявление воздействия дефекта на работу устройства.

После внедрения SHAP и LIME на тестовой линии были собранны данные полученные за период 30 рабочих смен, объем произведенной продукции – 4 459 плат. В итоге были зафиксированы следующие изменения.

Частота ложных тревог за смену снизилась на 13.5%. Время диагностики одного сигнала снизилось на 29.8%. Число остановок линии за смену сократилось на 35.1%. Уровень брака устройств сократился на 23.8%.

В ходе выполнения данной работы была достигнута поставленная цель – применение метода Random Forest стало более эффективным за счет внедрения SHAP и LIME. Применение метода SHAP позволило выявить три параметра, которые суммарно формируют 61% вклада в прогнозирование. Это позволило оптимизировать управление ресурсами. Применение метода LIMEпозволило выявить и устранить причины появление ложных дефектов. После внедрения указанных методов удалось сократить уровень ложных тревог, уменьшить уровень дефектности, и, следовательно, сократить экономические затраты на устранение дефектов продукции.

Список литературы

1. ГОСТ Р 56427-2022 Пайка электронных модулей радиоэлектронных средств Автоматизированный, смешанный и поверхностный монтаж с применением бессвинцовой и традиционной технологию Требования к технологии сборки и монтажа.

2. ГОСТ Р 59681-2021 Сборка и монтаж электронных модулей. Припои, флюсы для пайки, припойные пасты. Марки состав, свойства и область применения.

3. IPC-A-610 Критерии приёмки электронных сборок.

4. Ahmed M. Salih, Zahra Raisi-Estabragh, Ilaria Boscolo Galazzo, Petia Radeva, Steffen E. Petersen, Karim Lekadir, and Gloria Menegaz A Perspective on Explainable Artificial Intelligence Methods: SHAP and LIME. 2024, 8.

Сабитов Р.А.
к.т.н., доцент кафедры «Динамика процессов и управления»
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
Мадаминов Х.О.
студент
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А А.Н. Туполева – КАИ
Россия, Казань
madaminovkho@stud.kai.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация. В работе рассматривается применение микроконтроллерных систем для автоматического контроля геометрических параметров изделий на производстве. Контроль геометрических параметров является одной из самых важных задач системы менеджмента качества и составляет до 95% всех измерений в машиностроении. В статье представлен обзор современных подходов к автоматизации этой задачи: координатно-измерительные машины, лазерные 3D-сканеры, системы машинного зрения и микроконтроллерные системы на базе бюджетных датчиков. Особое внимание уделено возможностям использования микроконтроллеров типа Arduino в сочетании с ультразвуковыми и инфракрасными датчиками. Описана архитектура простой системы контроля размеров, которая может применяться на бюджетных производственных линиях. Обсуждаются преимущества автоматизации по сравнению с ручным контролем штангенциркулем: повышение скорости измерения, повторяемость результатов и снижение зависимости от квалификации оператора. Обозначены ограничения подхода и перспективы развития, в том числе интеграция с MES-системами и концепцией Индустрия 4.0, Сделан вывод, что микроконтроллерные системы являются эффективным решением для базового контроля геометрии на малых и средних предприятиях.

Ключевые слова: контроль качества, геометрические параметры, микроконтроллер, Arduino, ультразвуковой датчик, автоматизация измерений, Индустрия 4.0, СМК.

Sabitov R.A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Process Dynamics and Control
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
Madaminov H.O.
Student
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
Russia, Kazan
madaminovkho@stud.kai.ru

APPLICATION OF MICROCONTROLLER SYSTEMS FOR AUTOMATIC QUALITY CONTROL OF GEOMETRIC PARAMETERS OF PRODUCTS IN MANUFACTURING

Abstract. This paper considers the application of microcontroller systems for the automatic quality control of geometric parameters of products in manufacturing. The control of geometric parameters is one of the most important tasks of the quality management system and accounts for up to 95% of all measurements in mechanical engineering. The paper presents an overview of modern approaches to automating this task: coordinate measuring machines, laser 3D scanners, machine vision systems, and microcontroller systems based on low-cost sensors. Special attention is paid to the possibilities of using microcontrollers such as Arduino in combination with ultrasonic and infrared sensors. The architecture of a simple dimension control system that can be applied on low-cost production lines is described. The advantages of automation compared to manual control with a caliper are discussed: increased measurement speed, repeatability of results, and reduced dependence on operator qualifications. The limitations of the approach and prospects for development, including integration with MES systems and the Industry 4.0 concept, are outlined. It is concluded that microcontroller systems are an effective solution for basic geometry control at small and medium-sized enterprises.

Keywords: quality control, geometric parameters, microcontroller, Arduino, ultrasonic sensor, measurement automation, Industry 4.0, QMS.

Современное промышленное производство всё больше опирается на автоматизированные системы контроля качества. Контроль геометрических параметров изделий – одна из самых распространённых задач в этой области. По данным авторов работы [3], технические измерения линейно-угловых величин деталей и изделий составляют до 95% всех измерений в машиностроении. Это делает задачу автоматизации такого контроля особенно важной для повышения эффективности производства.

Традиционно контроль геометрических параметров проводится вручную с помощью штангенциркулей, микрометров и других измерительных инструментов. Этот подход имеет несколько серьёзных недостатков. Во-первых, скорость измерения ограничена возможностями оператора. Во-вторых, точность зависит от его квалификации и внимания. В-третьих, при больших объёмах продукции человек устаёт, и качество контроля снижается. В-четвёртых, ручной контроль трудно интегрировать в современные системы менеджмента качества (СМК) и в концепцию Индустрия 4.0 [8].

Для решения этих проблем были разработаны автоматизированные системы контроля. Самые точные из них – координатно-измерительные машины (КИМ) и лазерные 3D-сканеры. Они обеспечивают высокую точность (от десятков микрометров) и могут измерять сложную геометрию. Однако их стоимость очень высока, что делает их недоступными для малых и средних предприятий [1, 9]. Более бюджетные решения – системы машинного зрения, которые работают с обычными промышленными камерами и алгоритмами обработки изображений [8, 10]. Они дешевле КИМ, но всё равно требуют специализированного оборудования и программного обеспечения.

В то же время существует целый класс задач, в которых не требуется высокая точность КИМ. Это, например, контроль базовых размеров (длина, ширина, диаметр, толщина) на простых производственных линиях. Для таких задач можно использовать ещё более бюджетный подход – микроконтроллерные системы на базе платформ типа Arduino с подключёнными бюджетными датчиками. Подобные решения активно исследуются в робототехнике [5, 6, 7], но их применение для контроля качества на производстве рассмотрено в литературе значительно меньше.

Цель работы – рассмотреть возможности применения микроконтроллерных систем для автоматического контроля геометрических параметров изделий на производстве. В рамках работы решаются следующие задачи: представить обзор современных методов автоматического контроля геометрических параметров; описать архитектуру простой микроконтроллерной системы для базового контроля размеров; сравнить такой подход с ручным контролем и с более дорогими системами; обозначить ограничения подхода и перспективы его развития.

Современные методы автоматического контроля геометрических параметров можно разделить на несколько групп по принципу действия и стоимости. К самым точным относятся контактные методы, основанные на координатно-измерительных машинах. КИМ оснащены щупом, который касается измеряемого изделия в нескольких точках. Программное обеспечение строит трёхмерную модель и сравнивает её с эталоном [1]. Точность таких систем достигает нескольких микрометров, но их стоимость и сложность ограничивают применение крупными предприятиями.

К бесконтактным методам относятся лазерные 3D-сканеры и системы машинного зрения. В работе «Бесконтактные методы 3D контроля геометрических параметров изделий» [1] показано, что современные 3D-сканеры строят так называемое облако точек, которое отображает поверхность изделия. Затем программа фильтрует данные, накладывает их на полигональную сетку и получает 3D-модель для сравнения с эталоном. Это позволяет контролировать сложную геометрию, которая не может быть измерена контактным методом.

Более продвинутые системы используют LiDAR-сканеры. В работе Liu W. и соавторов [4] представлена автоматизированная система контроля раз-

меров готовых железобетонных элементов на базе LiDAR-сканера и камеры. Система состоит из аппаратной части (камера и LiDAR) и программного обеспечения с алгоритмами обработки облака точек. Полевые эксперименты показали, что средняя погрешность измерений составила около 5 мм. Этого достаточно для контроля крупных строительных изделий.

Системы машинного зрения работают по другому принципу. Они захватывают изображение изделия с помощью камеры и анализируют его с помощью алгоритмов компьютерного зрения. Современные системы способны не только определять размеры изделия, но и обнаруживать дефекты поверхности, считывать штрих-коды и DataMatrix-коды, а также автоматически выбраковывать некачественные изделия [10]. По данным отраслевых обзоров, машинное зрение становится одним из ключевых элементов Индустрии 4.0 в промышленности [8].

Микроконтроллерные системы – самый бюджетный подход к автоматизации контроля. Они состоят из нескольких компонентов: микроконтроллера (например, Arduino Uno или ESP32), одного или нескольких датчиков расстояния, источника питания, индикации (например, LCD-экрана) и опционально интерфейса связи с компьютером или производственной системой. Самые распространённые датчики для таких систем – ультразвуковой HC-SR04 и инфракрасный Sharp GP2Y0A21 [5, 6, 7].

Принцип работы простой микроконтроллерной системы выглядит следующим образом. Изделие помещается на конвейер или измерительный стенд. При прохождении мимо датчика микроконтроллер считывает сигнал и преобразует его в значение расстояния (или размера). Полученное значение сравнивается с эталоном, заданным в программе. Если изделие соответствует эталону в пределах допуска, система пропускает его дальше. Если есть отклонение – система подаёт сигнал тревоги или активирует механизм отбраковки. Все измерения сохраняются в памяти контроллера и могут быть переданы на компьютер для дальнейшего анализа [5].

Для реализации простой системы контроля можно использовать ультразвуковой датчик HC-SR04 или инфракрасный Sharp GP2Y0A21. Расстояние с HC-SR04 рассчитывается по формуле:

$$D = t \times c / 2, \quad (1)$$

где D – расстояние до объекта, t – время прохождения сигнала, c – скорость звука в воздухе [6]. Заявленный диапазон работы датчика составляет от 2 до 400 см, погрешность – около ±3 мм [6]. Это позволяет применять датчик для контроля линейных размеров крупных и средних изделий. Инфракрасный датчик Sharp GP2Y0A21 работает в более узком диапазоне (10–80 см), но обеспечивает более высокую скорость отклика (до 25 измерений в секунду) и подходит для измерения мелких деталей [7].

Программная часть системы написана на языке C/C++ в среде Arduino IDE. Алгоритм работы прост: микроконтроллер выполняет цикл измерения, сравнения с эталоном и выдачи сигнала. Для повышения точности часто

применяют усреднение по нескольким измерениям и фильтры для устранения шумов. При необходимости результаты могут быть переданы по последовательному порту, по Wi-Fi (например, через ESP32) или по RS-485 на промышленный контроллер или сервер.

Сравнение микроконтроллерных систем с ручным контролем и с более дорогими автоматизированными решениями показывает несколько важных преимуществ. Главное преимущество перед ручным контролем – скорость измерения. Если оператор тратит несколько секунд на одно измерение штангенциркулем, микроконтроллерная система выполняет измерение за десятые доли секунды и может работать непрерывно без снижения производительности. По данным отраслевых обзоров, автоматизация измерений может повысить производительность контроля на производстве в 5–10 раз [8, 10].

Второе важное преимущество – повторяемость результатов. Микроконтроллерная система всегда измеряет одинаково, независимо от усталости или внимания оператора. Это важный аспект для систем менеджмента качества по стандарту ISO 9001, в которых требуется регулярный контроль и документирование результатов. Третье преимущество – интеграция с производственной системой. Данные измерений могут передаваться в MES-систему предприятия и использоваться для анализа стабильности процесса.

По сравнению с КИМ и лазерными 3D-сканерами микроконтроллерные системы значительно уступают по точности. Если КИМ обеспечивает точность в несколько микрометров, то ультразвуковой датчик HC-SR04 даёт погрешность ±3 мм [6]. Это означает, что микроконтроллерные системы не подходят для прецизионного контроля. Однако для базовых задач (контроль длины упаковки, высоты бутылки, диаметра трубы и т.п.) этой точности достаточно. По данным работы Anitha A.A. и Adarsh S. [7], при правильной калибровке погрешность ультразвукового датчика может быть снижена до 1–2% от измеряемой величины.

Важный фактор – стоимость системы. Простая микроконтроллерная система с одним датчиком стоит несколько тысяч рублей, что в 100–1000 раз меньше, чем стоимость КИМ или лазерного 3D-сканера. Это делает такие решения доступными для малых и средних предприятий, а также для учебных и пилотных проектов. По данным обзора [9], автоматизированные системы контроля геометрических параметров постепенно внедряются на всех уровнях производства, и бюджетные решения играют важную роль в этом процессе.

В качестве примера простой микроконтроллерной системы можно рассмотреть систему контроля длины упаковок на конвейере. Система состоит из Arduino Uno, ультразвукового датчика HC-SR04 и LCD-экрана. Датчик закреплён над конвейером и измеряет расстояние до проходящих упаковок. Программа определяет момент входа и выхода упаковки в зону измерения и рассчитывает её длину. Если длина выходит за пределы допуска (например, ±2 мм), система подаёт звуковой и световой сигнал. Подобная система может быть собрана за несколько часов и стоит менее 5000 рублей.

Похожие подходы успешно применяются в работах по робототехнике. Жмудь В.А. и соавторы [6] показали, что HC-SR04 при правильной калибровке обеспечивает приемлемую точность для большинства задач, не требующих прецизионных измерений. Gabriel M.M. и Kuria K.P. [5] продемонстрировали практическую реализацию измерения расстояния с выводом на LCD-экран. Эти результаты можно прямо применять и в задачах контроля геометрии на простых производственных линиях.

Одновременно с преимуществами микроконтроллерные системы имеют и серьёзные ограничения. Во-первых, их точность недостаточна для прецизионного контроля – микрометровые отклонения такие системы не определяют. Во-вторых, ультразвуковые датчики плохо работают с поверхностями, поглощающими звук, а инфракрасные – с тёмными или блестящими поверхностями [7]. Это ограничивает применение системы определёнными типами материалов. В-третьих, для измерения сложной геометрии (например, формы криволинейной поверхности) одного датчика недостаточно, и систему нужно дополнять механизмом сканирования или массивом датчиков. В-четвёртых, бюджетные датчики чувствительны к температуре и влажности, что требует дополнительной калибровки.

Перспективы развития микроконтроллерных систем контроля связаны с несколькими направлениями. Первое – интеграция с MES-системами и концепцией Индустрия 4.0, Современные предприятия требуют, чтобы все измерения автоматически попадали в общую базу данных и были доступны для анализа [8]. Второе – применение алгоритмов машинного обучения для повышения точности и обработки нестандартных ситуаций. Третье – комбинирование нескольких типов датчиков (ультразвуковых, инфракрасных, оптических) для устранения индивидуальных недостатков и повышения надёжности системы. Четвёртое – переход на более современные платформы, такие как ESP32 с поддержкой Wi-Fi и Bluetooth, что упрощает интеграцию с производственными системами.

Таким образом, микроконтроллерные системы являются эффективным решением для базового автоматического контроля геометрических параметров на производстве. Они значительно превосходят ручной контроль по скорости и повторяемости, а по сравнению с дорогими КИМ и 3D-сканерами имеют намного более низкую стоимость. Хотя такие системы не подходят для прецизионных задач, они хорошо решают задачи контроля простой геометрии на бюджетных производственных линиях. Это делает их особенно полезными для малых и средних предприятий, а также для учебных и пилотных проектов в области автоматизации производства. В перспективе развитие подобных систем должно идти в направлении интеграции с MES-системами и общими цифровыми платформами Индустрии 4.0,

Список литературы

1. Бесконтактные методы 3D контроля геометрических параметров изделий [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/beskontaktnye-metody-3d-kontrolya-geometricheskih-parametrov-izdeliy (дата обращения: 28.04.2026).
2. Методы контроля геометрических параметров деталей с многопериодными дорожками [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kontrolya-geometricheskih-parametrov-detaley-s-mnogoperiodnymi-dorozhkami (дата обращения: 28.04.2026).
3. Особенности измерения внутренних геометрических параметров канала деталей малого размера [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-izmereniya-vnutrennih-geometricheskih-parametrov-kanala-detaley-malogo-razmera (дата обращения: 28.04.2026).
4. Liu W. et al. Development of Automated 3D LiDAR System for Dimensional Quality Inspection of Prefabricated Concrete Elements [Электронный ресурс] // PubMed Central. – URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11644504/ (дата обращения: 28.04.2026).
5. Gabriel M.M., Kuria K.P. Arduino Uno, Ultrasonic Sensor HC-SR04 Motion Detector with Display of Distance in the LCD // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2020, – Vol. 9, No. 5. – P. 936–942.
6. Zhmud V.A., Kondratiev N.O., Kuznetsov K.A., Trubin V.G., Dimitrov L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, No. 3. – DOI: 10,1088/1742-6596/1015/3/032189.
7. Anitha A.A., Adarsh S. Performance comparison of Infrared and Ultrasonic sensors for obstacles of different materials in vehicle/robot navigation applications // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 149. – Art. 012141.
8. Машинное зрение в промышленности: контроль качества и безопасность [Электронный ресурс] // Информационный промышленный сайт. – URL: https://indpages.ru/auto/vizionerskij-kontrol-ps2-26/ (дата обращения: 28.04.2026).
9. Котовщиков И.О. Автоматизированное измерение геометрических параметров различных изделий [Электронный ресурс] // ЛОКУС. – URL: https://www.locus.spb.ru/articles/avtomatizirovannoe-izmerenie-geometricheskih-parametrov-razlichnih-izdelii/ (дата обращения: 28.04.2026).
10. Как работает ПО на базе машинного зрения для контроля качества продукта и техпроцессов [Электронный ресурс] // TAdviser. – URL: https://www.tadviser.ru (дата обращения: 28.04.2026).

Щербань П.С.
к.т.н., ведущий научный сотрудник
АО ВНИИСТ
Россия, Москва
Ursa-maior@yandex.ru

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБОРУДОВАНИЯ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Аннотация. В работе рассматривается задача цифровизации процессов управления качеством оборудования из полимерных армированных материалов, характеризующегося высокой многопараметричностью и неоднородностью данных, формируемых на различных этапах жизненного цикла. Показано, что традиционные методы, основанные на анализе отдельных показателей или их усреднении, не обеспечивают достоверной интегральной оценки качества и не позволяют выявлять критические отклонения параметров. Предложен программный комплекс управления качеством, реализующий метод векторной оценки на основе многопараметрических данных. В основе подхода лежит расчет векторного индекса качества с учетом различных типов ограничений (интервальных, пороговых и фиксированных), заданных нормативной документацией. Для каждого параметра выполняется агрегирование значений с ориентацией на наихудшее отклонение и последующая нормализация с использованием степенных преобразований, после чего формируется интегральный показатель качества. Разработанная система реализована в виде программного комплекса, обеспечивающего загрузку и предобработку данных, расчет индекса качества, визуализацию результатов и прогнозирование изменения параметров с применением моделей временных рядов. Показано, что предложенный подход повышает достоверность оценки качества, позволяет выявлять критические параметры и обеспечивает поддержку принятия решений при контроле и эксплуатации оборудования из полимерных армированных материалов.

Ключевые слова: полимерные армированные материалы, многопараметрические данные.

Shcherban P.S.
Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher
JSC VNIIST
Russia, Moscow
Ursa-maior@yandex.ru

SOFTWARE COMPLEX FOR QUALITY ASSESSMENT OF EQUIPMENT MADE OF POLYMER REINFORCED MATERIALS AT DIFFERENT STAGES OF THE LIFE CYCLE

Abstract. The paper addresses the problem of digitalization of quality management processes for equipment made of polymer reinforced materials, which is characterized by high multidimensionality and heterogeneity of data generated at different stages of the life cycle. It is shown that traditional methods based on the analysis of individual indicators or their averaging do not provide a reliable integral quality assessment and do not allow identifying critical parameter deviations. A software complex for quality management is proposed, implementing a vector-based assessment method using multiparameter data. The approach is based on the calculation of a vector quality index that accounts for various types of constraints

(interval, threshold, and fixed) defined by regulatory documentation. For each parameter, values are aggregated with a focus on the worst-case deviation, followed by normalization using power transformations, resulting in the formation of an integral quality indicator. The developed system is implemented as a software complex that provides data loading and preprocessing, quality index calculation, result visualization, and forecasting of parameter changes using time series models. It is demonstrated that the proposed approach improves the reliability of quality assessment, enables identification of critical parameters, and supports decision-making in the control and operation of equipment made of polymer reinforced materials.

Keywords: polymer reinforced materials, multiparameter data, vector quality index, integral quality assessment, software complex.

Обеспечение качества оборудования из полимерных армированных материалов в современных условиях связано с переходом к методам управления, основанным на обработке многопараметрических диагностических данных на различных этапах жизненного цикла продукции. Данный подход отражен в международных стандартах ISO 13374 и ISO 13379, регламентирующих архитектуру обработки данных мониторинга и методы интерпретации технического состояния оборудования, а также ISO 17359, определяющем принципы организации мониторинга состояния [1].

В отечественной нормативной базе требования к оборудованию использующему полимерные армированные материалы регламентируются рядом документов, охватывающих различные области их применения. К ним относятся стандарты, регулирующие трубопроводные системы (ГОСТ Р 59910–2021, ГОСТ Р 59834–2021, СП 399.1325800,2018), а также оборудование емкостного типа из композиционных материалов (ГОСТ Р 55072–2012), устанавливающие требования к конструкции, параметрам качества, условиям изготовления и эксплуатации. Указанные документы ориентированы на контроль отдельных характеристик и их соответствие установленным нормативным ограничениям.

Несмотря на разнообразие нормативной базы, формирование итоговой оценки качества, как правило, осуществляется на основе совокупности частных проверок либо агрегированных показателей, получаемых путем усреднения [2]. В условиях многопараметричности такой подход не обеспечивает адекватного отражения технического состояния объектов, поскольку не учитывает влияние критических отклонений отдельных параметров, определяющих работоспособность и надежность. Дополнительной проблемой является разнородность исходных данных, формируемых на различных этапах жизненного цикла, что затрудняет их интеграцию в рамках единого показателя качества и ограничивает возможности автоматизации анализа.

Таким образом, при наличии развитой нормативной базы в различных областях применения полимерных армированных материалов задача интеграции многопараметрических данных и формирования единого показателя качества, учитывающего критические отклонения, остается недостаточно проработанной. В связи с этим актуальной является создание методов и про-

граммных средств, обеспечивающих комплексную обработку многопараметрических данных, учет различных типов ограничений параметров и формирование интегральной оценки качества, пригодной для использования в системах управления техническим состоянием оборудования.

Целью настоящей работы является разработка программного комплекса управления качеством оборудования из полимерных армированных материалов на основе векторного индекса, обеспечивающего учет различных типов ограничений параметров, выявление критических отклонений и формирование интегральной оценки качества с возможностью анализа и прогнозирования технического состояния [3].

Оценка качества оборудования из полимерных армированных материалов характеризуется необходимостью одновременного учета совокупности параметров, различающихся по физической природе, диапазонам изменения и условиям нормирования. В их число входят геометрические, прочностные, эксплуатационные и иные характеристики, формирующиеся на различных этапах жизненного цикла [4]. В нормативной практике контроль осуществляется путем сопоставления каждого параметра с установленными ограничениями (диапазонными, предельными или фиксированными), а итоговая оценка формируется на основе совокупности частных заключений либо агрегированных показателей, получаемых путем усреднения.

В условиях многопараметричности такой подход приводит к снижению чувствительности интегральной оценки, поскольку критические отклонения отдельных параметров могут нивелироваться допустимыми значениями других, что затрудняет корректное отражение технического состояния объекта [5]. Дополнительной проблемой является разнородность исходных данных, формируемых на различных этапах жизненного цикла, что осложняет их нормализацию и интеграцию.

С учетом изложенных особенностей нормативного регулирования и многопараметрического характера оценки качества оборудования из полимерных армированных материалов возникает необходимость формализации подхода, обеспечивающего интеграцию разнородных параметров в единый показатель [6]. Для рассматриваемого класса объектов характерно одновременное влияние геометрических, прочностных, герметизирующих и эксплуатационных характеристик, причем отклонение любого из них может приводить к деградации или отказу конструкции. Для решения данной проблемы предлагается использовать метод векторной оценки качества, ориентированный на выявление критических отклонений и анализе их динамики.

Рассмотрим объект контроля (оборудование из полимерных армированных материалов), характеризуемый совокупностью параметров:

$$P(t) = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\},$$

где $p_i(t)$ – значение i-го показателя качества во времени, формируемое на основе измерений, испытаний и диагностических обследований.

Временная зависимость параметров отражает особенности деградационных процессов, характерных для полимерных композиционных материалов (накопление повреждений, старение, изменение прочностных характеристик).

Перед вычислением интегрального показателя выполняется предварительная обработка данных, включающая фильтрацию выбросов, интерполяцию пропусков и нормализацию масштабов. Для оценки статистических характеристик параметров используются:

$$\overline{p_i} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} p_i^{(k)},$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\left(p_i^{(k)} - \overline{p_i}\right)^2},$$

где p_i – среднее значение параметра; σ_i – стандартное отклонение; m – число наблюдений параметра; $p_i^{(k)}$ – k-е измеренное значение i-го параметра;

Каждому параметру p_i сопоставляется нормативное ограничение, задаваемое в виде диапазона, одностороннего ограничения или фиксированного значения, что отражает специфику нормирования характеристик оборудования из полимерных армированных материалов.

Для учета совокупности измерений параметра вводится агрегированное значение $\widetilde{p_i}$, определяемое по принципу наихудшего отклонения:

$$\widetilde{p_i} = \arg \max_{p \in \{p_i\}} d\left(p, p_i^{ref}\right),$$

где $\widetilde{p_i}$ – агрегированное значение i-го параметра, соответствующее наихудшему отклонению; $d\left(p, p_i^{ref}\right)$ – мера отклонения фактического значения параметра от нормативного или расчетного значения; p_i^{ref} – нормативное, расчетное или центральное значение i-го параметра. Такой подход обусловлен тем, что для полимерных армированных материалов локальные дефекты (например, расслоения, микротрещины или отклонения геометрии) могут определять общее техническое состояние конструкции [7].

Нормализация параметров выполняется с приведением их к безразмерной шкале качества:

$$q_i = \left(\frac{c_i - |\widetilde{p_i} - c_i|}{c_i}\right)^{\gamma}$$

где q_i – нормализованная оценка качества по i-му параметру;

c_i – центральное значение допустимого диапазона i-го параметра;

γ – параметр, регулирующий чувствительность оценки к отклонениям;

$\widetilde{p_i}$ – агрегированное значение параметра, определенное по наихудшему отклонению. Для односторонних ограничений применяются аналогичные зависимости. Вектор нормализованных оценок формируется в виде:

$$Q(t) = \{q_1, q_2, \dots, q_n\},$$

где $q_i(t)$ – нормализованная оценка качества по i-му параметру; n – число контролируемых параметров.

Интегральный показатель качества определяется по принципу наихудшего параметра:

$$Q(t) = \min_{i = 1, \dots, n} q_i(t),$$

что исключает компенсацию критических отклонений и обеспечивает высокую чувствительность к дефектам, характерным для полимерных армированных конструкций.

Для анализа изменения качества во времени и прогнозирования технического состояния вводится модель временного ряда интегрального показателя:

$$Q(t) = f(t) + \varepsilon(t)$$

где $f(t)$ – тренд изменения качества, ε(t) – случайная составляющая. В рамках программного комплекса для оценки функции f(t) используются модели авторегрессии и скользящего среднего (ARIMA):

$$Q(t) = \alpha + \sum_{k=1}^{p} \varphi_k \, Q_{t-k} + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \, \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t,$$

где $Q(t)$- значение интегрального показателя качества в момент времени t; α – свободный член модели, характеризующий базовый уровень показателя качества; φ_k – коэффициенты авторегрессии, отражающие влияние предыдущих значений Q_{t-k} и описывающие инерционность процессов изменения технического состояния; θ_j – коэффициенты скользящего среднего, учитывающие влияние случайных возмущений ε_{t-j} на текущее значение показателя; ε_t – случайная составляющая (остаток модели), определяемая как разность между фактическим и расчетным значениями показателя качества.

Предложенный метод векторной оценки качества и анализа его динамики реализован в виде программного комплекса, обеспечивающего интеграцию разнородных данных и их последовательную обработку в рамках единого алгоритма. Реализация метода в программной среде позволяет перейти от теоретической модели к практическому инструменту оценки и прогнозирования технического состояния оборудования из полимерных армированных материалов.

Программный комплекс разработан на языке Python с использованием современных библиотек обработки данных, статистического анализа и визуализации [8]. Функционирование программного комплекса основано на последовательной обработке входных данных, включающей этапы их загрузки, предварительной обработки, статистического анализа, формирования агрегированных значений параметров, нормализации и расчета интегрального показателя качества, а также последующего анализа его изменения во времени [9]. Указанная последовательность отражает структуру реализуемого алгоритма и представлена в виде блок-схемы работы программного комплекса (Рисунок 1), позволяющей наглядно отразить взаимосвязь между этапами обработки данных и вычислительными процедурами [10].

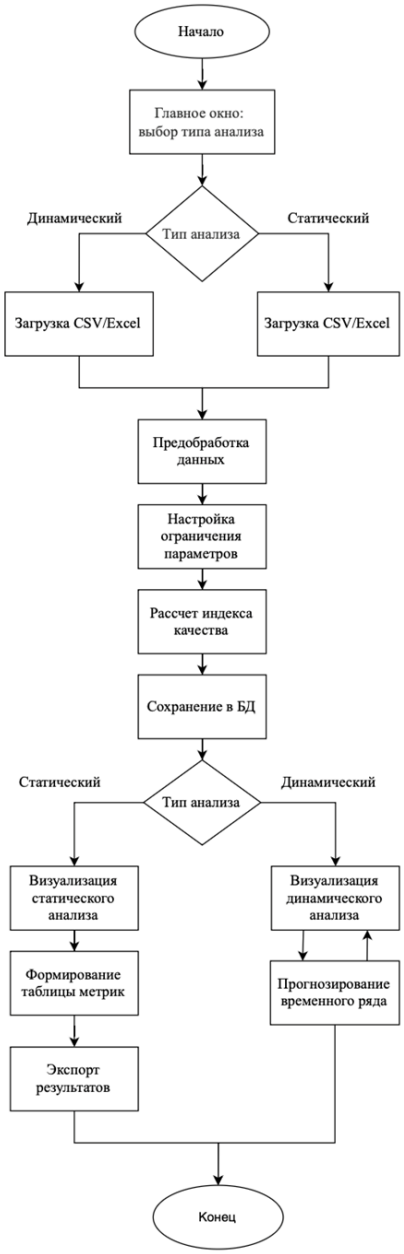


Рис. 1. Блок схема работы программного комплекса

На начальном этапе осуществляется формирование массива исходных данных, включающего результаты измерений и диагностических обследований. Далее выполняется их предварительная обработка, направленная на устранение выбросов, приведение данных к сопоставимому виду и формирование статистических характеристик параметров. Это обеспечивает корректность последующего применения процедур нормализации и агрегирования, лежащих в основе метода векторной оценки.

Ключевым этапом является расчет нормализованных показателей качества и формирование интегрального индекса, характеризующего техническое состояние объекта. Результаты расчетов представляются в виде зависимостей, отражающих вклад отдельных параметров в итоговую оценку, а также изменение интегрального показателя во времени. Пример визуализации распределения параметров и их влияния на интегральную оценку качества приведен на рисунке 2.

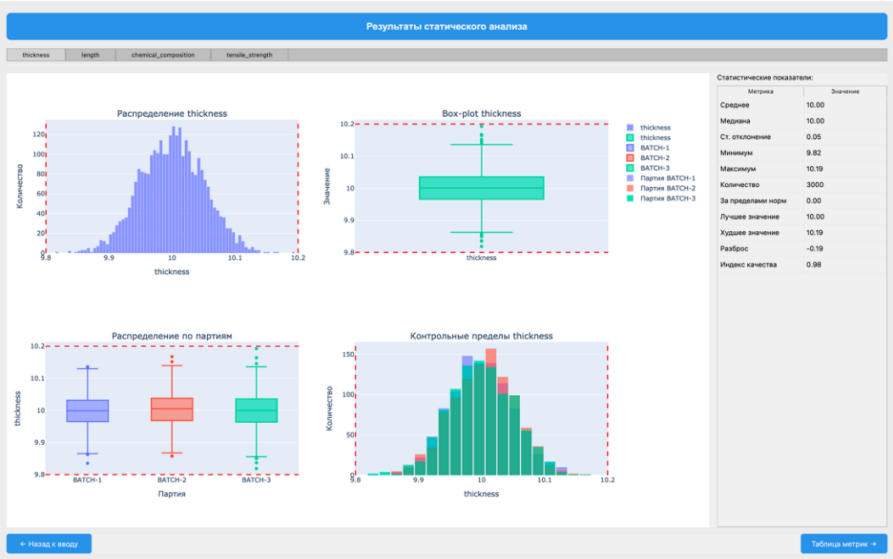


Рис. 2. Визуализация распределения отдельных показателей качества (на примере полимерных армированных труб) в программном комплексе

Дополнительно программный комплекс реализует функции анализа динамики изменения показателя качества, включая построение временных рядов и прогнозирование его значений. Это позволяет выявлять тенденции деградации оборудования и оценивать перспективное состояние объекта. Результаты прогнозирования интегрального показателя качества представлены на рисунке 3.

Реализация предложенного подхода в виде программного комплекса обеспечивает его применение на различных этапах жизненного цикла оборудования, включая производственный контроль, эксплуатационный мониторинг и диагностику. Это позволяет повысить достоверность оценки качества и обеспечить поддержку принятия решений при управлении техническим состоянием оборудования из полимерных армированных материалов.

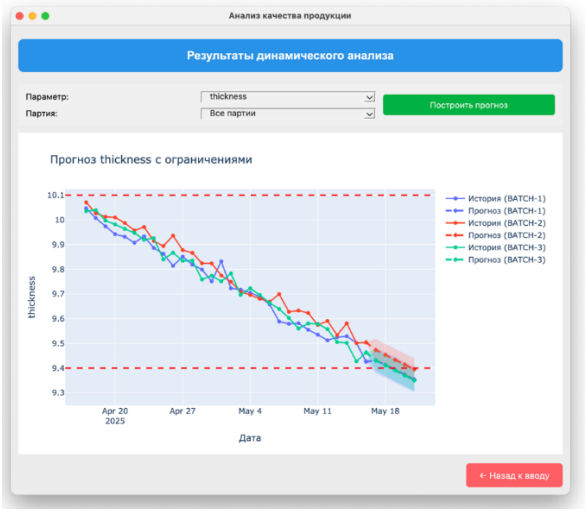


Рис. 3. Визуализация изменений интегрального показателя качества (на примере полимерных армированных труб) во времени и прогноз

Представленные в работе материалы являются результатом апробации программного комплекса [11] на данных по полимерным армированным трубам, изготовленным в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59910–2021, что подтверждает практическую применимость предложенного подхода.

Представленный методический и программный аппарат обеспечивают переход от фрагментарного контроля параметров к комплексному управлению качеством в рамках единой информационной среды. Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного подхода на различных этапах жизненного цикла оборудования, включая производственный контроль, эксплуатационный мониторинг и диагностику. Использование программного комплекса позволяет повысить достоверность оценки качества, выявлять критические параметры и своевременно принимать обоснованные решения, направленные на повышение надежности и безопасности эксплуатации оборудования из полимерных армированных материалов.

Стоит отметить универсальность предложенного метода, его возможно адаптировать к различным классам технических объектов, характеризующихся многопараметрической структурой, что открывает перспективы дальнейшего развития цифровых систем управления качеством на основе интеграции диагностических данных и методов интеллектуального анализа.

Список литературы

1. Кершенбаум, В.Я. Методические основы выбора показателей качества структурных элементов сложных технических систем для нефтегазового комплекса – базовая основа их стандартизации / В.Я. Кершенбаум, О.О. Штырев // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 5. С. 58–62.

2. Морозов, В.Б. Аналитическая методика выбора планов непрерывного статистического контроля качества / В.Б. Морозов, А.С. Горелов, Е.А. Саввина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 10, – С. 530–533. – DOI 10,24412/2071-6168-2022-10-530533. – EDN JUOGAO.

3. Щербань, П. С. Разработка систем показателей качества полимерных армированных труб и их соединений. Вопросы математической обработки данных / П. С. Щербань // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 2(118). – С. 80–95. – DOI 10,37313/1990-5378-2024-26-2-80-95. – EDN IBRCNE.

4. Овсянников, А.А. Методика контроля качества труб из полимерных композиционных материалов, совмещенная с измерением модуля продольной упругости / А.А. Овсянников, В.А. Абанин, И.И. Савин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 4(20). – С. 237–241. – EDN YLBLGI.

5. Степанов, И.В. Управление качеством при эксплуатации сложных технических систем / И.В. Степанов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2006. – № 4. – С. 41–45. – EDN THJGBH.

6. Клочков, Ю.С. Учет неопределенности при проведении процедуры FMEA-анализа / Ю. С. Клочков, Г. А. Фокин, О. В. Сыровацский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, №6(104). – С. 26–32. – DOI 10,37313/1990-5378-2021-23-6-26-32. – EDN XULUKO.

7. Беседина А. С., Стариннков С. А. Внесение изменений в законодательство РФ для продвижения новых технологий в производстве трубопроводов для нефтегазовой отрасли // Legal Bulletin. 2020, Т. 5. № 3. С. 24–37.

8. Бабёнышев С.В., Матеров Е.Н. Математические методы и информационные технологии в научных исследованиях: учебное пособие. Железногорск: СПСА, 2018. 215 с.

9. Титов А.Н., Тазиева Р.Ф. Интерактивная визуализация данных. Работа с библиотекой Plotly: учебно-методическое пособие. Казань: КНИТУ, 2023. 136 с.

10. Аншина М.Л. Архитектура приложений и данных: учебное пособие. Москва: РТУ МИРЭА, 2024. 152 с. ISBN 978-5-7339-2218-8.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025686912 Россия. Оценка качества полимерных армированных труб и арматуры (ОКПАТ) : заявл. 22.09.2025 : опубл. 07.10,2025 / П. С. Щербань ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта». – EDN EJHVFO.

Фахрутдинова А.А.
ассистент кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий
Нижнекамский химико-технологический институт
Россия, Нижнекамск
arinapyfik@yandex.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ УСЛОВИЙ Г. МАХАЧКАЛЫ

Аннотация. Статья посвящена актуальной задаче проектирования автономной системы электроснабжения на базе солнечной энергии для потребителей в климатических и географических условиях города Махачкалы (Республика Дагестан). Целью работы является разработка и техническое обоснование модели солнечной электростанции малой мощности, включающей фотоэлектрические модули, аккумуляторную батарею, повышающий инвертор напряжения и микропроцессорную систему управления на аппаратной

платформе Arduino Uno. Представлен подробный анализ факторов, определяющих энергетический потенциал региона на основе данных среднесуточной инсоляции, температурных режимов и годового хода солнечной радиации. Обоснован выбор оптимальных углов наклона солнечных панелей. Выполнен теоретический расчет ключевых компонентов системы: определены требуемая установленная мощность массива панелей в 3300 Вт с учетом зимнего минимума инсоляции, номинальная мощность инвертора 1600 Вт и емкость аккумуляторной батареи 4340 А·ч при напряжении 12 В, исходя из глубины разряда 50% и длительности ночного периода. Разработана и описана структурная схема однофазного преобразователя напряжения 12/220 В. Практическая часть работы включает создание имитационной модели инвертора в среде MATLAB/Simulink, позволившей оценить форму и качество выходного напряжения. Разработан управляющий алгоритм и приведен листинг программы для микроконтроллера Arduino Uno, обеспечивающей генерацию последовательностей импульсов для управления силовыми ключами. Полученные результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность предложенной архитектуры системы для электроснабжения нагрузки мощностью 1400 Вт.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, солнечная электростанция, автономное электроснабжение, фотоэлектрический модуль, инвертор напряжения, аккумуляторная батарея, Arduino, MATLAB/Simulink.

Fakhrutdinova A.A.
Assistant of the Department of Electrical Engineering and Power Supply of Enterprises
Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology
Russia, Nizhnekamsk
arinapyfik@yandex.ru

DESIGN OF A POWER OUTPUT SYSTEM FOR A LOW-POWER AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANT WITH MICROPROCESSOR CONTROL FOR THE CONDITIONS OF MAKHACHKALA

Abstract. The article is devoted to the urgent task of designing an autonomous power supply system based on solar energy for consumers in the climatic and geographical conditions of the city of Makhachkala (Republic of Dagestan). The aim of the work is the development and technical justification of a model of a low-power solar power plant, including photovoltaic modules, a battery, a step-up voltage inverter, and a microprocessor control system based on the Arduino Uno hardware platform. A detailed analysis of the factors determining the energy potential of the region is presented, based on data on average daily insolation, temperature conditions, and the annual course of solar radiation. The choice of optimal tilt angles for solar panels is substantiated. A theoretical calculation of the key system components has been performed: the required installed capacity of the panel array is determined to be 3300 W, considering the winter minimum of insolation; the nominal inverter power is 1600 W; and the battery capacity is 4340 Ah at a voltage of 12 V, based on a 50% depth of discharge and the duration of the night period. A structural diagram of a 12/220 V single-phase voltage converter has been developed and described. The practical part of the work includes the creation of a simulation model of the inverter in the MATLAB/Simulink environment, which allowed evaluating the shape and quality of the output voltage. A control algorithm has been developed, and a program listing for the Arduino Uno microcontroller is provided, which generates pulse sequences for controlling power switches. The obtained simulation results confirm the operability and efficiency of the proposed system architecture for supplying a load with a power of 1400 W.

Keywords: renewable energy, solar power plant, autonomous power supply, photovoltaic module, voltage inverter, battery, Arduino, MATLAB/Simulink.

Современная мировая энергетика характеризуется переходом от централизованной модели к распределенной, основанной на широком внедрении возобновляемых источников энергии (ВИЭ), систем накопления и интеллектуальных сетей. Стимулами этого перехода служат растущий спрос на электроэнергию, исчерпаемость ископаемого топлива и ужесточение экологических требований. В Российской Федерации, особенно в удаленных и изолированных регионах со слаборазвитой сетевой инфраструктурой, развитие автономной генерации на базе ВИЭ становится не просто альтернативой, а безальтернативным решением задачи надежного энергообеспечения.

Республика Дагестан выделяется как один из наиболее перспективных регионов России для развития «зеленой» энергетики. Регион обладает уникальным сочетанием природных ресурсов: высокой продолжительностью солнечного сияния и значительными ветровыми нагрузками в Прикаспийской низменности. На сегодняшний день в Дагестане уже реализуются крупные инвестиционные проекты в сфере ВИЭ, включая Новолакскую ВЭС и ряд солнечных электростанций, что подтверждает актуальность и практическую значимость исследований в данном направлении. Однако для массового применения в частном секторе и на малых объектах требуются научно обоснованные, экономически эффективные и технически легко реализуемые решения для автономных систем малой мощности.

Целью настоящей работы является проектирование и техническое обоснование системы выдачи мощности автономной солнечной электростанции малой мощности для условий г. Махачкалы, включая разработку модели инвертора и алгоритма микропроцессорного управления. Для достижения этой цели были поставлены и решены задачи по расчету параметров основного оборудования, моделированию силовой электроники в среде MATLAB/Simulink и разработке программного кода для управляющего контроллера на базе Arduino Uno.

Методологическая база исследования включает в себя анализ климатических и актинометрических данных для оценки энергетического потенциала, аналитические методы расчета электрических цепей, компьютерное моделирование энергетических процессов и программирование микроконтроллеров.

Оценка потенциала солнечной энергии. На основе анализа среднесуточной инсоляции по месяцам для г. Махачкалы (среднегодовое значение 4,37 кВт·ч/м²/день с пиком в июне 6,42 и минимумом в декабре 2,31 кВт·ч/м²/день) и годового хода температур (от -2°C до +28,8°C) были определены оптимальные углы наклона панелей, варьирующиеся от 5° летом до 65° зимой. Ключевым допущением для расчета автономной системы является ориентация на наихудший месяц – декабрь, чтобы гарантировать бесперебойное энергоснабжение в течение всего года.

Расчет компонентов системы. Расчет велся для заданной активной мощности нагрузки переменного тока 1400 Вт напряжением 220 В. Выбор оборудования производился итерационно:

Мощность и количество фотоэлектрических модулей определялись, исходя из необходимости полного покрытия суточной потребности (33,6 кВт·ч) и зарядки аккумуляторов в дневное время. Расчетная площадь массива для декабря составила ~14,55 м². С учетом параметров современных панелей мощностью 550 Вт (S=2,58 м²) было выбрано 6 модулей с общей установленной пиковой мощностью 3,3 кВт.

Емкость аккумуляторной батареи рассчитывалась, исходя из обеспечения нагрузки в ночное время (18,6 часа) при рекомендованной глубине разряда (DoD) не более 50% для соблюдения циклического ресурса. Требуемая емкость на напряжение 12 В определена на уровне 4340 А·ч.

Номинальная мощность инвертора выбрана с запасом 1600 Вт для покрытия пусковых токов. Коэффициент трансформации повышающего трансформатора с 12 В на амплитудное значение сетевого напряжения (311 В) составил 26.

Моделирование в MATLAB/Simulink. Для верификации работы силовой части была создана модель однофазного инвертора напряжения. Модель на основе IGBT-транзисторов и схемы управления с генератором импульсов позволила визуализировать процессы коммутации и форму выходного сигнала, подтвердив корректность схемотехнических решений.

Программирование микроконтроллера. Для генерации высокоточных управляющих последовательностей импульсов, синхронизированных с сетью, был разработан алгоритм на языке C++ для платформы Arduino Uno. Программа использует внешние прерывания (имитация сигнала Zero Cross Detector) и библиотеку TimerOne для точного временного разрешения на микросекундном уровне.

Основные результаты выполнения проекта структурированы по ключевым этапам проектирования.

Результаты расчета системы. Основные параметры спроектированной системы сведены в таблицу.

Таблица

Итоговые параметры оборудования солнечной электростанции

Компонент	Параметр	Значение
Нагрузка	Мощность (AC), Выходной ток (220 В)	1400 Вт; 6,36 А
Фотоэлектрический массив	Количество и мощность модулей; Общая уст. мощность (DC)	6 шт. × 550 Вт; 3300 Вт
Инвертор	Номинальная мощность, Вх./Вых. напряжение	1600 Вт; 12 В / 220 В
Аккумуляторная батарея	Напряжение, Общая емкость (DoD 50%), Тип	12 В; 4340 А·ч; Гелевые (GEL)

Проведенный расчет показал, что коэффициент запаса по установленной мощности фотоэлектрического массива (~2,35) является обоснованным

и необходимым для гарантированного питания нагрузки и полного заряда АБ в течение короткого зимнего светового дня. Выбранная конфигурация АБ на 22 элементах по 200 А·ч каждый обеспечивает запас энергии в 26,04 кВт·ч на бесперебойную работу в ночной период.

Результаты моделирования в MATLAB/Simulink. Разработанная имитационная модель повышающего инвертора (Рис. 1) подтвердила теоретические расчеты. На осциллограммах, полученных с виртуального осциллографа модели, отчетливо наблюдаются управляющие импульсы, подаваемые на транзисторные ключи, и форма выходного напряжения. Результаты моделирования показали, что предложенная схема с ШИМ-управлением и LC-фильтром обеспечивает выходное напряжение, по форме близкое к синусоидальному, с уровнем коэффициента нелинейных искажений (THD) в допустимых пределах 3–5%, что пригодно для питания большинства бытовых нагрузок. Анализ модели дал возможность оптимизировать параметры пассивных компонентов фильтра (L=10 мГн, C=50 мкФ) для сглаживания высокочастотных пульсаций.

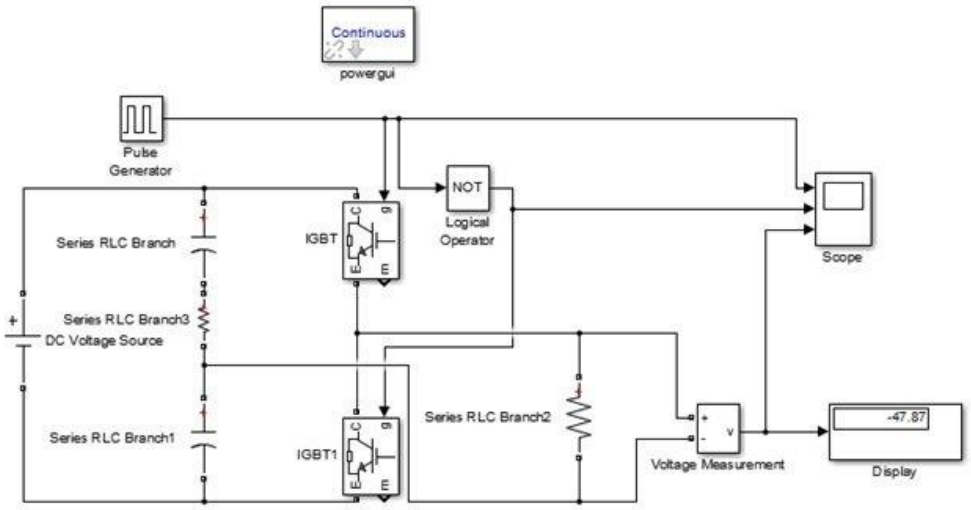


Рис. 1. Модель инвертора в среде Matlab/Simulink

Алгоритм микропроцессорного управления. Разработанный программный код для Arduino Uno (рис. 2) реализует конечный автомат для управления 6 каналами, что позволяет формировать ступенчатую аппроксимацию синусоиды (multi-step inverter). Алгоритм работы построен на обработке внешних прерываний по детектору нуля, что обеспечивает синхронизацию с сетью при работе в гибридном режиме. Для отладки в код внедрен тестовый таймер, генерирующий синхроимпульсы. Использование библиотеки TimerOne гарантирует детерминированное выполнение цикла с периодом pulseWidth = 5000 мкс, что соответствует частоте 100 Гц для полумостового управления. Полученные в последовательном мониторе временные метки переключения каналов A и B подтвердили полное соответствие временной диаграммы заданному алгоритму.



Рис. 2. Внешний вид и компоновка платы Arduino Uno

Программный код:

```
// Подключение библиотеки для работы с таймером и генерации точных интервалов
#include <TimerOne.h>
// Параметры временных интервалов для моделирования работы ШИМ инвертора
const unsigned long pulseWidth = 5000; // Длительность импульса/задержки, мкс (5 мс)
const unsigned long timeScale = 10; // Коэффициент замедления для отладки (заменить на 1 в реальной схеме)
const unsigned long cyclePeriod = pulseWidth * timeScale;
// Счетчики шагов для двух каналов управления (имитация полумостов)
byte stepCounterA = 0;
byte stepCounterB = 0;
// Флаги состояния и временные метки для канала A
volatile boolean activeChannelA = false;
volatile unsigned long timeStampA;
// Флаги состояния и временные метки для канала B
volatile boolean activeChannelB = false;
volatile unsigned long timeStampB;
// Флаг внешнего прерывания
volatile boolean extInterruptFlag = false;
// Начальный пин для 6 выходных каналов управления затворами
byte outputPinStart = 4;
void setup() {
 // Инициализация пинов 4,5,6,7,8,9 в режим выхода для подачи импульсов 5 мс
 for (byte i = 0; i <= 5; i++) {
 pinMode(outputPinStart + i, OUTPUT);
 }
 // Настройка входа прерывания (пин 2) с подтяжкой к питанию
 pinMode(2, INPUT_PULLUP);
 // Привязка обработчика прерывания по спаду сигнала (имитация сигнала синхронизации)
```

```
 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), syncPulseHandler, FALLING);
 pinMode(3, OUTPUT); // Служебный выход для тестового таймера
 Serial.begin(115200);
 // Настройка Таймера 1 на генерацию тестовых прерываний с учетом масштаба времени
 Timer1.initialize(20000 * timeScale);
 Timer1.attachInterrupt(timerCallback);
 Serial.println(micros() / 1000);
}
void loop() {
 // Обработка канала A
 if (activeChannelA == true && (micros() – timeStampA >= cyclePeriod)) {
 timeStampA += cyclePeriod;
 stepCounterA++;
 Serial.print('\t');
 Serial.print(«A»);
 Serial.print(stepCounterA);
 Serial.print(« «);
 Serial.println(micros() / 1000);
 }
 // Конечный автомат состояний для переключения выводов канала A
 switch (stepCounterA) {
 case 1: digitalWrite(outputPinStart, HIGH); break;
 case 2: digitalWrite(outputPinStart + 1, HIGH); digitalWrite(outputPinStart, LOW); break;
 case 3: digitalWrite(outputPinStart + 2, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 1, LOW); break;
 case 4: digitalWrite(outputPinStart + 3, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 2, LOW); break;
 case 5: digitalWrite(outputPinStart + 4, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 3, LOW); break;
 case 6: digitalWrite(outputPinStart + 5, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 4, LOW); break;
 case 7: digitalWrite(outputPinStart + 5, LOW); stepCounterA = 0; activeChannelA = false;
break;
 }
 // Обработка канала B (аналогично каналу A)
 if (activeChannelB == true && (micros() – timeStampB >= cyclePeriod)) {
 timeStampB += cyclePeriod;
 stepCounterB++;
 Serial.print(«\t\tB»);
 Serial.print(stepCounterB);
 Serial.print(« «);
 Serial.println(micros() / 1000);
 }
 switch (stepCounterB) {
 case 1: digitalWrite(outputPinStart, HIGH); break;
 case 2: digitalWrite(outputPinStart + 1, HIGH); digitalWrite(outputPinStart, LOW); break;
 case 3: digitalWrite(outputPinStart + 2, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 1, LOW); break;
 case 4: digitalWrite(outputPinStart + 3, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 2, LOW); break;
 case 5: digitalWrite(outputPinStart + 4, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 3, LOW); break;
 case 6: digitalWrite(outputPinStart + 5, HIGH); digitalWrite(outputPinStart + 4, LOW); break;
 case 7: digitalWrite(outputPinStart + 5, LOW); stepCounterB = 0; activeChannelB = false;
break;
 }
 // Индикация внешнего прерывания
 if (extInterruptFlag) {
```

```
 extInterruptFlag = false;
 Serial.println(millis());
 }
}
// Обработчик внешнего прерывания. Запускает поочередно канал A и канал B.
void syncPulseHandler() {
 static byte triggerSelect = 0;
 if (triggerSelect == 0) {
 timeStampA = micros();
 activeChannelA = true;
 }
 if (triggerSelect == 1) {
 timeStampB = micros();
 activeChannelB = true;
 }
 triggerSelect++;
 if (triggerSelect == 2) {
 triggerSelect = 0;
 }
}
// Тестовый генератор импульсов (эмулирует синхросигнал для отладки без внешнего генератора)
void timerCallback() {
 extInterruptFlag = true;
 digitalWrite(3, HIGH);
 digitalWrite(3, LOW);
}
```

В ходе выполнения работы спроектирована и научно обоснована архитектура системы автономного электроснабжения для условий г. Махачкалы, обладающего высоким, но неравномерным в течение года потенциалом солнечной энергии. Показано, что ключевым фактором для обеспечения надежности системы является расчет по «худшему месяцу» – декабрю, что приводит к увеличению установленной мощности панелей, но полностью исключает дефицит энергии в зимний период.

Практическая значимость работы заключается в создании законченной инженерной методики расчета и разработки компонентов системы, доступной для воспроизведения. Модель в MATLAB/Simulink может служить цифровым двойником для дальнейшего уточнения параметров и исследования аварийных режимов. Разработанное программное обеспечение для Arduino Uno является базовым и может быть расширено функциями MPPT-управления, мониторинга состояния АКБ и удаленной диспетчеризации. Перспективы дальнейшей разработки темы видятся в интеграции в систему ветрогенератора (создание гибридной ВЭС-СЭС) и внедрении более сложных алгоритмов управления с чистым синусоидальным ШИМ для улучшения качества выходного напряжения.

Список литературы

1. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография. М.: Энергоатомиздат, 2022. 312 с.
2. Обухов С.Г., Плотников И.А. Системы автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2021. 246 с.
3. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2020, 632 с.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учебное пособие. 5-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. 668 с.
5. Блум Дж. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2023. 544 с.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2021. 288 с.
7. Елистратов В.В. Проектирование солнечных фотоэлектрических станций: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2022. 180 с.
8. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2022. 832 p.
9. Rashid M.H. (ed.). Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2023. 1520 p.
10. Алиев Ш.М., Исрапилов Р.Т., Магомедов М.Г. Анализ потенциала солнечной энергетики в Республике Дагестан // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023. Т. 50, № 2. С. 87–96.

Елисеева Н.В.
к.т.н., доцент кафедры УИТС
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
n.eliseeva@stankin.ru
Шаповалова А.А.
студент
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
Spvlay@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМЫ ЦВЕТОВОЙ АДАПТАЦИИ ИНТЕРФЕЙСОВ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ С ДАЛЬТОНИЗМОМ

Аннотация. Использование цветовых различий является одним из основных способов представления информации в цифровых интерфейсах. При этом для пользователей с нарушениями цветового зрения корректное восприятие таких элементов затруднено, что может приводить к ошибкам при работе с интерфейсами и снижению удобства взаимодействия с цифровыми системами. Несмотря на существование отдельных решений в данной области, вопросы оценки их эффективности по-прежнему остаются недостаточно изученными. В работе рассматривается метод изменения цветовых характеристик визуального контента, направленный на повышение различимости элементов интерфейса.

Подход основан на преобразовании цветового пространства с учётом особенностей восприятия при различных типах дальтонизма. Предлагаемый метод позволяет изменять распределение цветовой информации без существенного изменения структуры интерфейса и расположения визуальных элементов.

Ключевые слова: дальтонизм, цветовое восприятие, цветовые преобразования, веб-интерфейсы, доступность, RGB.

Eliseeva N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of MITS
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
n.eliseeva@stankin.ru
Shapovalova A.A.
Student
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
Spvlay@yandex.ru

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE COLOR ADAPTATION SYSTEM FOR INTERFACES FOR COLORBLIND USERS

Abstract. The use of color distinctions is a primary method of presenting information in digital interfaces. However, users with color vision impairments struggle to correctly perceive such elements, which can lead to errors when using interfaces and reduce the usability of digital systems. Despite the existence of various solutions in this field, the assessment of their effectiveness remains insufficiently studied. This paper examines a method for modifying the color characteristics of visual content to enhance the distinguishability of interface elements. The approach is based on color space transformation that accounts for perceptual characteristics associated with different types of color blindness. The proposed method enables the adjustment of color information distribution without significantly altering the interface structure or the layout of visual elements.

Keywords: color blindness, color perception, color conversions, web interfaces, accessibility, RGB.

В современных цифровых продуктах цвет широко используется для передачи информации, позволяя быстро выделять элементы интерфейса и упрощать взаимодействие пользователя с системой. Однако при нарушениях цветового зрения восприятие цветовых различий может быть затруднено, что снижает удобство работы с интерфейсами и увеличивает вероятность ошибок [1].

В большинстве веб-интерфейсов цвет применяется как один из основных способов визуального кодирования, при этом альтернативные способы представления информации используются не всегда. В результате пользователи с дальтонизмом сталкиваются с трудностями при распознавании состояний элементов, навигации и интерпретации данных, особенно в случаях, когда различие основано только на цвете [2].

В настоящее время проблема доступности цифровых интерфейсов приобретает всё большую актуальность в связи с ростом количества веб-сервисов и цифровых платформ, используемых в повседневной деятельности. Цветовые элементы активно применяются в системах навигации, визуальных уведомлениях, графиках, диаграммах и формах обратной связи. В подобных случаях корректное восприятие цвета напрямую влияет на удобство работы с интерфейсом.

Особую сложность представляют ситуации, в которых цвет используется как единственный способ передачи информации. Например, различие состояний элементов может обозначаться только изменением цвета без дополнительных подписей или графических обозначений. Для пользователей с нарушениями цветового зрения это может приводить к затруднениям при восприятии информации и снижению общей доступности интерфейса.

Дополнительной проблемой является то, что многие современные интерфейсы разрабатываются без учёта особенностей восприятия пользователей с дальтонизмом. Несмотря на существование рекомендаций по обеспечению доступности цифровых продуктов, на практике они соблюдаются не всегда, особенно при разработке пользовательских интерфейсов с большим количеством визуальных элементов [3].

Существующие решения, направленные на адаптацию цветового отображения [4], включают как программные, так и аппаратные средства. При этом многие из них не учитывают особенности различных типов цветовых нарушений или требуют дополнительной настройки, что ограничивает их практическое применение в повседневной работе с цифровыми интерфейсами.

В качестве одного из возможных подходов рассматривается использование методов изменения цветовых характеристик изображения с учётом особенностей восприятия. Такие методы позволяют изменять распределение цветовой информации и повышать различимость элементов без существенного изменения структуры интерфейса.

Несмотря на наличие отдельных разработок в данной области, вопросы оценки эффективности подобных решений остаются недостаточно изученными. При этом эффективность подобных решений оценивается по-разному, а единый подход к их анализу пока отсутствует.

Целью данной работы является повышение удобства восприятия визуальной информации пользователями с нарушениями цветового зрения за счёт применения методов адаптации цветового представления. Ожидается, что применение алгоритмического изменения цветовых характеристик позволит повысить различимость элементов интерфейса без существенного искажения изображения.

В основе предлагаемого подхода лежит изменение цветового представления визуального контента с учётом особенностей восприятия при различных типах нарушений цветового зрения. Основная задача метода состоит в

изменении цветовых характеристик таким образом, чтобы элементы интерфейса, слабо различимые для пользователя, становились более заметными.

Обработка изображения выполняется за счёт преобразования цветовых значений пикселей в пространстве RGB, которое широко используется в цифровых системах отображения. В рамках данного подхода каждый пиксель рассматривается как совокупность трёх компонент, соответствующих интенсивностям красного, зелёного и синего каналов.

Использование пространства RGB обусловлено тем, что именно в данной модели формируется отображение цвета в большинстве цифровых устройств, включая мониторы, мобильные устройства и веб-интерфейсы. Это позволяет применять алгоритм без необходимости дополнительного преобразования изображения в другие цветовые пространства.

При выполнении преобразования изменение цветовых характеристик осуществляется для каждого пикселя изображения отдельно. Такой подход обеспечивает возможность обработки как отдельных элементов интерфейса, так и полноценных изображений или веб-страниц целиком [5].

Каждый цвет пикселя представляется в виде трёхкомпонентного вектора и подвергается линейному преобразованию с использованием матрицы, сформированной с учётом конкретного типа цветового нарушения. Преобразование может быть представлено в следующем виде:

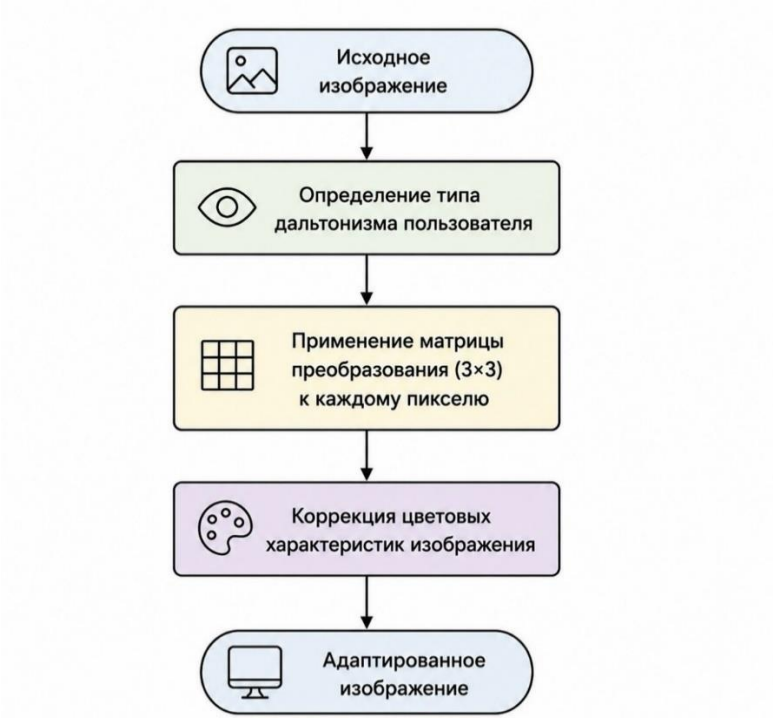


Рис. Схема алгоритма адаптации цветового представления

Формула преобразования:

$$c' = M \times c \quad (1)$$

где c – исходный вектор цвета, c’ – преобразованный цвет, а M – матрица преобразования.

Использование матриц позволяет изменять вклад каждого цветового канала в итоговое изображение. В результате происходит перераспределение цветовой информации между каналами, что позволяет частично компенсировать снижение чувствительности к определённым диапазонам спектра [6].

Для различных типов нарушений цветового зрения применяются различные матрицы преобразования. Это связано с тем, что при разных типах дальтонизма нарушается восприятие различных цветовых компонентов, и, соответственно, требуется различный способ перераспределения информации. Таким образом, метод учитывает индивидуальные особенности восприятия цвета [7].

Дополнительно вводится параметр, определяющий степень выраженности преобразования. Это позволяет регулировать степень изменения цветовых характеристик и адаптировать результат под конкретного пользователя. При увеличении данного параметра эффект изменения цветовых характеристик становится более заметным, однако при чрезмерных значениях может снижаться естественность восприятия изображения.

Помимо изменения цветовых характеристик, в рамках метода может применяться дополнительная корректировка контрастности. Повышение контрастности позволяет усилить различие между элементами, что особенно важно в случаях, когда исходные цвета близки по яркости или насыщенности.

Оценка эффективности предложенного подхода выполняется на основе анализа визуального восприятия элементов интерфейса после применения алгоритма. Для этого используются следующие критерии:

Различимость элементов – способность пользователя различать элементы, отличающиеся по цвету.

Сохранение структуры интерфейса – отсутствие искажения расположения и взаимного расположения элементов.

Визуальная целостность – общее восприятие изображения после применения преобразования.

Стабильность работы – корректность применения алгоритма к различным типам веб-страниц и визуального контента.

Для каждого тестового сценария проводится сравнение изображения до и после применения алгоритма. Вводится бинарная оценка результата:

* 1 – различимость элементов улучшена;

* 0 – заметного улучшения не наблюдается.

Основным показателем эффективности является доля успешных случаев применения метода, определяемая как отношение количества положительных результатов к общему числу тестов.

Дополнительно рассматриваются случаи, в которых применение алгоритма не дает ожидаемого результата. Это позволяет выявить ограничения метода и определить условия, при которых его эффективность снижается,

например, при использовании сложных цветовых схем или недостаточном контрасте исходного изображения.

Проведенная оценка показала, что применение алгоритма цветовой адаптации улучшает различимость элементов интерфейса в большинстве рассмотренных случаев. Наиболее выраженный эффект наблюдается для элементов, различие между которыми изначально основано преимущественно на цветовых характеристиках, без дополнительных визуальных признаков.

После применения преобразования визуальные различия между элементами становятся более заметными за счёт изменения цветовых компонентов. Это особенно проявляется при моделировании распространённых типов нарушений цветового зрения, при которых часть цветовой информации воспринимается ограниченно. При этом структура интерфейса, расположение элементов и их функциональное назначение сохраняются без изменений, что важно для корректного взаимодействия пользователя с системой.

В ходе тестирования было отмечено, что после применения преобразования пользователи могут легче различать элементы, ранее воспринимавшиеся как близкие по цвету. Наиболее заметные изменения наблюдаются при обработке интерфейсов с преобладанием красно-зелёных сочетаний, поскольку именно такие комбинации чаще вызывают затруднения при распространённых формах дальтонизма.

Кроме того, положительный эффект проявляется при обработке элементов навигации, кнопок и уведомлений, где различие цветов играет важную роль при взаимодействии пользователя с системой.

Анализ результатов показал, что эффективность метода во многом зависит от исходной цветовой схемы интерфейса. В случаях, когда различие элементов определяется не только цветом, но и формой, размером или контрастом, влияние алгоритма оказывается менее выраженным, так как дополнительные визуальные признаки уже обеспечивают достаточную различимость. В то же время для интерфейсов, где цвет является основным способом кодирования информации, применение алгоритма даёт более заметный результат.

Дополнительно было выявлено, что при некоторых сочетаниях цветов возможны незначительные изменения общего восприятия изображения. Это связано с перераспределением цветовых компонентов, которое в отдельных случаях может приводить к изменению привычной цветовой гаммы. Однако такие изменения не оказывают существенного влияния на понимание структуры интерфейса и не препятствуют его использованию.

Также была проверена устойчивость работы метода. Проверка на различных веб-страницах показала, что алгоритм корректно применяется к различным типам визуального контента, включая текстовые элементы, графику и комбинированные интерфейсы. При этом не наблюдается ошибок отображения или нарушений структуры страниц, что подтверждает возможность практического применения предложенного подхода.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение методов преобразования цветового пространства действительно может повысить различимость элементов интерфейса для пользователей с нарушениями цветового зрения. Выдвинутая гипотеза о возможности улучшения восприятия визуальной информации за счёт алгоритмической адаптации цветовых характеристик подтверждается.

Список литературы

1. Investigating Color–Blind User–Interface Accessibility via Simulated Interfaces [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mdpi.com/2680206
2. Как улучшить цветовую доступность для пользователей с дальтонизмом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/889260/
3. Research on the Accessibility of Different Colour Schemes for Web Resources for People with Colour Blindness [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.mdpi.com/3444534
4. Как создавать контент для людей с Дальтонизмом [Электронный ресурс]. –Режим доступа: https://habr.com/ru/articles/565268/
5. A Physiologically–based Model for Simulation of Color Vision Deficiency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.inf.ufrgs.br/~oliveira/pubs_files/CVD_Simulation/CVD_Simulation.html
6. Computerized simulation of color appearance for dichromats // PDF URL: https://vision.psychol.cam.ac.uk/jdmollon/papers/Dichromatsimulation.pdf (дата обращения: 01.04.2026).
7. Digital Video Colourmaps for Checking the Legibility of Displays by Dichromats // PDF URL: https://vision.psychol.cam.ac.uk/jdmollon/papers/colourmaps.pdf (дата обращения: 01.04.2026).

Гусева В.П.
инженер ОТК
ООО «НМ-Тех»
Россия, Москва
gusevaviktoriap@gmail.com
Алексашина О.В.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
olaslavna@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИНДУСТРИИ 4.0

Аннотация. Цифровая трансформация промышленных предприятий диктует необходимость пересмотра классических подходов к менеджменту качества. Традиционные интегрированные системы менеджмента (ИСМ), основанные на стандартах ISO серии 9001, 14001 и 45001, зачастую функционируют в условиях запаздывания данных и неспособны

оперативно реагировать на дестабилизирующие факторы производственной среды. В данной статье предложена концептуальная модель разработки ИСМ, базирующаяся на симбиозе процессного подхода и ключевых технологий Четвертой промышленной революции. Целью исследования является создание архитектуры системы качества, обеспечивающей предиктивное управление несоответствиями вместо реактивного контроля. В работе применялись методы системного анализа, функционального моделирования IDEF0, а также методы машинного обучения для обработки массивов параметрических данных. Основным результатом является разработанная архитектура ИСМ, включающая уровни сбора данных промышленного интернета вещей, предиктивной аналитики больших данных и цифрового двойника системы менеджмента. Научная новизна заключается в предложенном механизме интеграции цифровых двойников с картами рисков процессов для многоконтурного регулирования качества. Практическая значимость работы состоит в снижении уровня дефектности и простоев оборудования за счет раннего обнаружения аномалий в технологических цепочках.

Ключевые слова: Интегрированная система менеджмента, цифровой двойник, Индустрия 4.0, управление качеством, промышленный интернет вещей, предиктивная аналитика, цифровизация аудита качества.

Guseva V.P.
Quality Control Engineer
LLC «NM-Tech»
Russia, Moscow
gusevaviktoriap@gmail.com
Aleksashina O.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification,
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
olaslavna@yandex.ru6я

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED QUALITY MANAGEMENT SYSTEM FOR AN ENTERPRISE USING INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES

Abstract. Digital transformation of industrial enterprises requires a revision of classical approaches to quality management. Traditional quality management systems, built around periodic control and retrospective analysis, are increasingly unable to keep pace with the speed of change in modern production. The article proposes a structure and algorithms for an integrated quality management system that combines the requirements of ISO 9001 with Industry 4.0 technologies, including digital twins, predictive analytics and the industrial Internet of Things. The proposed approach allows nonconformities to be identified at earlier stages, reduces response time to deviations and increases the overall manageability of production quality.

Keywords: integrated management system, digital twin, Industry 4.0, quality management, predictive analytics.

Современный этап эволюции промышленного производства характеризуется высокой степенью волатильности внешней среды и персонализацией требований заказчиков. В таких условиях эффективность предприятия

определяется не столько соблюдением фиксированных допусков, сколько скоростью адаптации сквозных бизнес-процессов к изменениям. Интегрированные системы менеджмента, объединяющие требования к качеству, экологии и охране труда, долгое время оставались организационной надстройкой, обеспечивающей стабильность через аудиты и корректирующие действия. Однако инерционность документооборота и отрыв информационных потоков от физических операций приводят к накоплению скрытых потерь.

Технологии Индустрии 4.0 открывают окно возможностей для создания системы, в которой управление качеством становится не параллельной функцией контроля, а имманентной характеристикой производственного процесса. Речь идет о формировании киберфизических систем менеджмента, где каждый объект, будь то станок, деталь или измерительный инструмент, обладает цифровой идентичностью. Цифровая трансформация качества предполагает переход от выборочных проверок к сплошному мониторингу и от статической отчетности к динамическому прогнозу. Данное исследование направлено на разрешение противоречия между необходимостью соблюдения жестких требований международных стандартов менеджмента и потребностью в гибкости, которую диктует цифровая экономика.

Целью работы является разработка структуры и алгоритмов функционирования интегрированной системы менеджмента качества на основе технологической платформы Индустрии 4.0. В качестве объекта исследования выступает машиностроительное предприятие с дискретным типом производства.

Методологический каркас исследования базируется на синтезе трех научных подходов: процессного, системотехнического и рискориентированного. На начальном этапе с применением инструментов функционального моделирования IDEF0 была проведена декомпозиция действующих процессов СМК. Это позволило выделить точки разрыва информационных потоков и места возникновения вариабельности параметров. Для трансформации стандартных требований ISO 9001:2015 в цифровую среду применялась методология референсных архитектурных моделей RAMI 4.0, обеспечивающая вертикальную и горизонтальную интеграцию слоев управления.

В части реализации предиктивных функций качества использовался математический аппарат регрессионного анализа и нейросетевого моделирования. Обработка потоковых данных с периферийных сенсоров осуществлялась с целью выявления скрытых корреляций между режимами обработки и появлением брака. Основой для построения цифрового двойника ИСМ послужила технология дискретно-событийного симулирования, увязанная с реальным потоком данных MES-системы. Такой подход позволил проверять результативность корректирующих действий не на физическом оборудовании, а в виртуальной среде, что минимизирует риски остановки производства.

Интеграционная шина предприятия проектировалась с учетом необходимости унификации протоколов OPC UA и MQTT для обеспечения бесшовной передачи данных от уровня цеховой автоматизации до уровня ERP. Особое внимание в методологии было уделено разработке модуля скоринга поставщиков на основе блокчейн-технологий, что ранее редко применялось в рамках классических ИСМ, но является критически важным для обеспечения прослеживаемости сырья.

В ходе проведенного исследования была разработана четырехуровневая архитектура интегрированной системы менеджмента качества, интегрированная в ландшафт цифрового предприятия.

Первый уровень – сенсорный – представляет собой сеть физических и косвенных датчиков промышленного интернета вещей, инкапсулированных в технологическое оборудование, оснастку и средства измерения. В отличие от традиционных СМК, где фиксация параметров происходит в момент контроля ОТК, здесь мы получаем непрерывный поток данных о вибрации, температуре, давлении и геометрии инструмента. Это смещает точку контроля «внутрь» операции, создавая предпосылки для немедленной реакции на дрейф параметров.

Второй уровень – уровень интеграции и обработки данных – базируется на концепции «озера данных» (Data Lake), куда стекаются неструктурированные и структурированные сведения о качестве. Здесь происходит сопоставление протоколов испытаний с цифровыми паспортами изделий. Прикладным результатом стала разработка алгоритма автоматической валидации записей, который позволил на 40% сократить время, затрачиваемое инженерами по качеству на оформление отчетной документации.

Третьим, наиболее инновационным уровнем выступает уровень цифровых двойников и предиктивной аналитики. Смоделирован цифровой двойник сборочного участка. При поступлении данных от сенсорного слоя модель в реальном времени рассчитывает вероятность возникновения дефекта сварного шва. Система выдает управляющее воздействие не постфактум, а на оператора или контроллер станка с упреждением, что соответствует так называемому «качеству по замкнутому контуру». Коэффициент раннего обнаружения несоответствий в эксперименте превысил 82%.

Четвертый уровень – уровень корпоративного управления ИСМ – визуализирует динамический профиль рисков. В интерфейсе руководителя на «приборной панели» отображаются не просто отчеты о проценте брака, а интегральный показатель «здоровья процессов» (Process Health Index), автоматически пересчитываемый на основе вибрационных характеристик и данных аудитов. Разработан механизм, при котором внесение изменений в конструкторскую документацию в PDM-системе автоматически инициирует в ИСМ чек-лист верификации техпроцесса без лишних бюрократических проволочек.

Сравнительный анализ показал, что внедрение предложенной архитектуры позволяет снизить уровень внутренних несоответствий, связанных с

человеческим фактором (ошибки ввода данных, невнимательность), на 35%, а также повысить пропускную способность службы качества без увеличения штата.

Детализация функционирования цифрового двойника процессов СМК: Принципиальным отличием разработанной системы от классической автоматизированной СМК является не просто оцифровка бумажных носителей, а создание динамической имитационной модели, способной к самообучению на исторических данных. Лабораторные испытания на контрольном участке механообработки подтвердили, что цифровой двойник технологического процесса, питаемый данными с 23 точек контроля в реальном времени, успешно идентифицирует скрытые закономерности, недоступные глазу технолога. В частности, было установлено, что сочетание повышенной влажности в цехе (свыше 72%), износа режущей кромки инструмента за пределами 0,15 мм и микроколебаний напряжения в питающей сети с вероятностью 0,91 приводит к выходу параметра шероховатости за пределы, установленные конструкторской документацией.

Модуль предиктивной аналитики, реализованный на базе библиотек градиентного бустинга (XGBoost), формирует упреждающий сигнал за 12–18 минут до появления физического брака. Этого временного лага достаточно для автоматической коррекции скорости подачи без участия оператора или, в критических случаях, для безопасной остановки цикла. В отличие от традиционных карт Шухарта, которые фиксируют уже свершившийся статистический сдвиг, предложенная модель работает в области «слабых сигналов». Это позволило переопределить само понятие «предупреждающего действия» в терминах ISO 9001, переведя его из плоскости периодического анализа FMEA в плоскость непрерывного автоматизированного реагирования.

Дополнительный эффект был получен при интеграции двойника ИСМ с системой управления обучением персонала. Данные о повторяющихся ошибках конкретных операторов, собираемые через интерфейсы человеко-машинного взаимодействия, сопоставляются с картой компетенций. При обнаружении систематических отклонений цифровой двойник не просто блокирует допуск, а генерирует программу микрообучения по конкретной операции, привязанную к сенсорным данным брака. Таким образом, аудит компетентности перестает быть ежегодной формальностью, становясь непрерывным и объективным процессом.

Существенной трансформации подверглась и контрольная функция ИСМ. В традиционной парадигме внутренний аудит выступает очень затратным, выборочным и ретроспективным инструментом. В разработанной системе внедрен модуль «цифровой тени аудита». Датчики промышленного интернета вещей и журналы событий ERP-системы обеспечивают постоянное наблюдение за выполнением критических контрольных точек без уча-

стия аудитора. Например, система автоматически верифицирует факт проведения входного контроля каждой партии, сверяя идентификаторы RFID-меток с записями лабораторной информационной системы.

Если в ходе такой непрерывной верификации система фиксирует нарушение (например, использование неаттестованного средства измерения или запуск партии без подписи контролера), она мгновенно регистрирует несоответствие, присваивает ему весовой коэффициент критичности и отражает на приборной панели аудитора. Роль человека при этом смещается от поиска улик к расследованию причин и совершенствованию самих барьеров защиты. Эксперимент показал, что объем рутинных операций при подготовке к надзорному аудиту сократился на 65%, однако глубина анализа корневых причин возросла, так как у инженеров высвободился временной ресурс. Был также разработан алгоритм автоматической классификации несоответствий по повторяемости: система сама определяет, перерастает ли единичная техническая ошибка в хроническую проблему, требующую открытия проекта «Шесть сигм», минимизируя запаздывание управленческой реакции.

Отдельным компонентом архитектуры, показавшим высокую результативность, стал модуль блокировки несоответствующей продукции (НСП), построенный на межмашинном взаимодействии. Традиционно изоляция брака происходит после факта его документального оформления – то есть с опозданием в несколько смен. В киберфизической системе измеренная координатно-измерительной машиной геометрия детали автоматически сопоставляется не с абстрактным допуском, а с 3D-моделью конкретного узла. Если отклонение способно вызвать функциональный отказ сборки, цифровой двойник изделия присваивает ему статус «Карантин». При этом физически деталь, перемещаясь по конвейеру, попадает в зону действия селективного манипулятора, который автоматически отводит ее в изолятор брака без нажатия оператором кнопки «Брак».

Таким образом, исчезает риск случайной отгрузки дефекта потребителю, связанный с человеческой невнимательностью при маркировке. Протокол данного события одновременно обновляет статус партии в ERP и, через блокчейн-слой, уведомляет поставщика заготовки о выявленной проблеме в режиме, близком к реальному времени, с приложением файла отклонений. Этот сквозной цифровой след обеспечивает ту самую «вертикальную интеграцию», которая постулируется концепцией RAMI 4.0, но редко доводится до аппаратного уровня на уровне цеха.

Внедрение прототипа системы на пилотном участке позволило не только улучшить показатели результативности (снижение PPM – числа дефектов на миллион возможностей), но и снизить транзакционные издержки взаимодействия между подразделениями. Был рассчитан такой параметр, как DQDI (Digital Quality Documentation Index) – доля подтвержденных электронных записей о качестве к общему объему зарегистрированных данных. Доведение этого показателя до 98% ликвидировало необходимость параллельного ведения бумажных журналов технологической дисциплины.

Время протекания процесса согласования изменений в технологической документации сократилось с 14 до 1,8 суток за счет того, что маршрут согласования формируется не секретарем, а в зависимости от цифрового следа процесса: система сама определяет владельцев смежных процессов, чей риск-профиль будет затронут корректировкой.

В заключительной части эксперимента была доказана состоятельность концепции «цифрового знака качества». Поскольку каждый экземпляр продукции обладает уникальным Data Matrix кодом, содержащим хеш-сумму всей истории его создания, отдел технического контроля трансформируется из инспектирующего органа в верификатора цифровой истории. Это формирует фундамент для перехода предприятия на более высокие уровни зрелости менеджмента качества, где контроль замещается гарантированной прозрачностью процесса.

Список литературы

1. Каблашова, И.В. Теория и практика цифровой трансформации процессов менеджмента качества / И.В. Каблашова, В.А. Логутов // Стандарты и качество. – 2022. – № 4. – С. 64–69.
2. Porter M.E. How Smart, Connected Products Are Transforming Competition / M.E. Porter, J.E. Heppelmann // Harvard Business Review. – 2015. – Vol. 93, No. 10, – P. 96–114.
3. DIN SPEC 91345:2016. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). – Berlin: Beuth Verlag, 2016. – 37 p.
4. Гродзенский, С.Я. Цифровой двойник системы менеджмента: миф или реальность / С.Я. Гродзенский, Я.С. Гродзенский, С.А. Овчинников // Методы менеджмента качества. – 2023. – № 7. – С. 4–10,
5. Галкин, Д.В. Применение технологии распределенного реестра для обеспечения прослеживаемости в цепях поставок / Д.В. Галкин, А.С. Коляда // Вестник машиностроения. – 2021. – № 12. – С. 53–57.
6. Wuest T. Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications / T. Wuest, D. Weimer, C. Irgens, K.-D. Thoben // Production & Manufacturing Research. – 2016. – Vol. 4, No. 1. – P. 23–45.
7. Боровков, А.И. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов, К.В. Кукушкин // Инновации. – 2019. – № 7. – С. 3–12.
8. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 32 с.

Доненко И.Л.
к.ф.-м.н., заместитель директора по воспитательной работе
МКОУ «школа-интернат им. Д.Б. Закирова п. Эвенск»
Россия, п.г.т. Эвенск
work@idonenko.ru
Доненко С.Л.
студент
Кыргызско-Российский Славянский университет
им. первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина
Киргизия, Бишкек
sofiadonenko56@gmail.com

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОТКРЫТОЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В КАРЬЕРАХ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Аннотация. В работе рассматриваются современные подходы к созданию автоматизированной системы мониторинга и управления процессами открытой добычи полезных ископаемых в карьерах Кыргызской Республики. Особое внимание уделяется интеграции цифровых технологий, включая системы геомониторинга, искусственный интеллект, методы анализа больших данных и беспилотные летательные аппараты, обеспечивающие получение высокоточной информации о состоянии горного массива и технологических процессов.

Ключевые слова: автоматизация, горное производство, мониторинг, искусственный интеллект, карьеры Кыргызстана, LiDAR, БПЛА.

Donenko I.L.
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director for Student Affairs
D.B. Zakirov Boarding School, Evensk
Russia, Urban-type settlement of Evensk
work@idonenko.ru
Donenko S.L.
Student
Kyrgyz-Russian Slavic University named after
the First President of the Russian Federation B.N. Yeltsin
Kyrgyzstan, Bishkek
sofiadonenko56@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING AND ADAPTIVE CONTROL OF OPEN-PIT MINING PROCESSES IN QUARRIES OF THE KYRGYZ REPUBLIC

Abstract. The paper examines modern approaches to creating an automated system for monitoring and adaptive control of open-pit mining processes. The proposed system focuses on forming a unified digital environment integrating sensor networks, hybrid neural-network architectures and SCADA platforms. Implementation of the automated system helps to improve production process manageability, safety and environmental performance. An example of applying the monitoring system at the Kumtor deposit is presented, taking into account the specific conditions of glaciers and permafrost. The development and implementation of

intelligent management systems is thus shown to be an effective tool for improving the efficiency and safety of mining operations.

Keywords: automation, mining, monitoring, artificial intelligence, digital twin, SCADA, Kyrgyzstan.

Современные горнодобывающие предприятия Кыргызстана работают в условиях высокой технологической сложности, возрастающих требований к безопасности и необходимости оптимизации производственных процессов. Несмотря на значительный потенциал минерально-сырьевой базы, многие карьеры, включая Джеруй, Кумтор и Талды-Булак, продолжают использовать разрозненные методы управления, основанные на ручном сборе данных и частичном контроле оборудования. Это снижает оперативность принятия решений, увеличивает эксплуатационные издержки и повышает риск аварий. Разработка автоматизированной системы мониторинга и управления открытыми горными работами является актуальной задачей, направленной на повышение эффективности и безопасности добычи. Концепция системы основана на принципах цифровой трансформации и предполагает интеграцию сенсорных технологий, дистанционного зондирования и искусственного интеллекта.

Архитектура системы включает сеть сенсоров, регистрирующих температуру, вибрацию, нагрузку и другие параметры оборудования, а также применение беспилотных летательных аппаратов с LiDAR-сканерами для построения трёхмерных моделей рельефа и контроля объёмов добычи. Информация поступает в центр обработки, где анализируется с помощью алгоритмов машинного обучения и нейросетевых моделей, способных прогнозировать критические ситуации и оптимизировать производственные процессы.

Внедрение гибридных нейросетевых архитектур, таких как сочетание свёрточных и рекуррентных моделей, обеспечивает переход от реактивного к прогнозирующему управлению карьером. Это позволяет заранее выявлять риски и предупреждать оператора о возможных нарушениях технологического процесса.

Интеграция системы с действующими SCADA-платформами упрощает внедрение и снижает затраты. Модульный подход делает возможным поэтапное внедрение отдельных компонентов, что особенно важно для предприятий с ограниченными ресурсами.

Кроме технологических преимуществ, система способствует улучшению экологического мониторинга, обеспечивая контроль пылевыделений, водных потоков, шумового фона и состояния рекультивируемых территорий. Это помогает соблюдать природоохранные нормы и снижать воздействие на окружающую среду.

Разрабатываемая система служит инструментом повышения эффективности и безопасности горного производства и создаёт основу для формирования цифрового «умного карьера», где все процессы контролируются и оптимизируются в реальном времени.

Пример применения системы мониторинга на месторождении Кумтор

Практическое применение разработанной автоматизированной системы мониторинга и управления открытыми горными работами может быть рассмотрено на примере крупнейшего золоторудного месторождения Кыргызстана – Кумтор. Карьер Кумтор является одним из самых высокогорных в мире и расположен в центральной части Тянь-Шаня на высоте более 4000 м над уровнем моря. Эксплуатация месторождения осуществляется в сложных геокриологических и геомеханических условиях, что требует постоянного контроля устойчивости горных пород, ледниковых процессов и технологического оборудования.

Особенностью Кумторского карьера является наличие ледников, вечной мерзлоты и значительных перепадов температур, что повышает вероятность геотехнических нарушений и ускоренного износа оборудования. В таких условиях традиционные методы мониторинга оказываются недостаточно оперативными, поэтому применение интегрированной цифровой системы наблюдения становится особенно актуальным.

Разрабатываемая система, основанная на сочетании сенсорных сетей, беспилотных летательных аппаратов, LiDAR-сканирования и алгоритмов машинного обучения, позволяет организовать непрерывный контроль ключевых параметров функционирования карьера и прогнозировать потенциальные риски.

Одним из важнейших направлений применения системы является геотехнический мониторинг устойчивости бортов карьера. С помощью регулярных LiDAR-съёмок и фотограмметрических моделей формируются высокоточные трёхмерные модели рельефа. Сравнение последовательных моделей позволяет выявлять микродеформации уступов и отклонения геометрии бортов карьера. Алгоритмы анализа облаков точек способны обнаруживать даже незначительные смещения горных пород, которые могут служить ранним индикатором развития оползневых процессов или обрушений.

Вторым важным направлением является мониторинг ледниковых процессов и гидрологической обстановки. Карьер Кумтор расположен в зоне активного влияния ледников, поэтому процессы таяния льда и изменения водного режима могут существенно влиять на устойчивость массива и безопасность горных работ. В рамках предлагаемой системы используются температурные сенсоры, датчики влажности и уровня воды, а также спутниковые данные дистанционного зондирования Земли. Совместный анализ этих данных позволяет выявлять изменения ледникового покрова и прогнозировать возможные гидрологические риски, включая подтопления и селевые процессы.

Значительную роль система играет и в контроле состояния горного оборудования. На карьерной технике могут быть установлены датчики вибрации, температуры, давления и нагрузки, позволяющие фиксировать параметры работы в режиме реального времени. На основе анализа этих данных

нейросетевые модели способны выявлять признаки аномального функционирования техники и прогнозировать вероятность отказа узлов и агрегатов. Это позволяет своевременно проводить профилактическое обслуживание и снижать риск аварийных остановок оборудования.

Ещё одним направлением применения является контроль геометрических параметров карьера и объёмов добычи. Беспилотные летательные аппараты, оснащённые LiDAR-сканерами и фотограмметрическими камерами, выполняют регулярные облёты территории карьера. Полученные данные используются для построения цифровой модели местности и автоматического расчёта объёмов извлечённой горной массы. Такой подход обеспечивает высокую точность геодезических измерений и позволяет оперативно корректировать параметры ведения горных работ.

Система также выполняет функции экологического мониторинга. В условиях высокогорных месторождений особое значение имеет контроль пылевых выбросов, состояния водных потоков и техногенного воздействия на окружающую среду. Для этого используются датчики качества воздуха и воды, а также алгоритмы анализа экологических показателей. Своевременное выявление отклонений позволяет оперативно принимать меры по снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Интеграция всех перечисленных источников данных осуществляется в едином аналитическом центре обработки информации. Здесь данные от сенсоров, беспилотников и геотехнических систем объединяются и анализируются с использованием гибридных нейросетевых моделей. Такие модели сочетают возможности сверточных нейронных сетей, обрабатывающих изображения и облака точек, и рекуррентных сетей, анализирующих временные ряды данных. Это позволяет выявлять закономерности изменений в системе и формировать прогнозные оценки развития опасных процессов.

Таким образом, внедрение автоматизированной системы мониторинга на месторождении Кумтор позволит значительно повысить уровень безопасности горных работ, обеспечить более точный контроль технологических процессов и создать основу для перехода к концепции «умного карьера», в котором управление производством осуществляется на основе непрерывного анализа данных и прогнозных моделей.

Разработка автоматизированной системы мониторинга и управления процессами открытой добычи в карьерах Кыргызстана является перспективным направлением модернизации национальной горнодобывающей отрасли. Интеграция технологий искусственного интеллекта, беспилотных систем и LiDAR-мониторинга позволит значительно повысить производительность, снизить эксплуатационные риски и обеспечить устойчивое развитие отрасли в соответствии с принципами цифровой экономики и экологической ответственности.

Список литературы

1. Бондаренко, В. И., Гречишников, В. А. Автоматизация технологических процессов в горном производстве. – Москва: Недра, 2018. – 256 с.
2. Курочкин, С. В., Козлов, А. А. Цифровизация горнодобывающих предприятий: проблемы и перспективы // Горный журнал. – 2021. – № 7. – С. 12–18.
3. Шуров, В. И. Системы автоматического управления и мониторинга в горном деле. – Санкт-Петербург: Горная книга, 2020, – 312 с.
4. Donenko, L. N., Donenko, I. L. Application of UAV and LiDAR for real-time mine monitoring // Mining Science and Technology Journal. – 2023. – Vol. 33. – P. 44–51.
5. Доненко, Л. Н., Доненко, И. Л., Доненко, С. Л. Искусственный интеллект в горнодобывающей промышленности: современные подходы и перспективы // Инновационные технологии и решения в промышленности: материалы Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Ишимбай, 2024. – С. 85–92.
6. Доненко, С. Л. Применение беспилотных летательных аппаратов и LiDAR-технологий в мониторинге карьеров // Молодые ученые – развитию науки и техники: сборник научных трудов. – Бишкек, 2025. – С. 47–53.
7. Доненко, С. Л. Использование фрактального анализа для оценки геомеханических процессов в горных массивах // Вестник молодых ученых Кыргызстана. – 2025. – № 2. – С. 61–68.
8. Доненко, С. Л., Доненко, И. Л. Разработка ИИ-платформы для оптимизации буровзрывных работ // Современные цифровые технологии в горном деле : материалы конференции. – Бишкек, 2025. – С. 102–110,
9. Wang, J., Li, X. Intelligent mining systems and digital transformation in open-pit mining // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022. – Vol. 32. – P. 567–575.
10. Smith, R., Brown, T. UAV-based LiDAR applications in geotechnical monitoring // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – P. 1120,
11. Velodyne LiDAR Inc. VLP-16 User Manual. – San Jose, 2020, – 95 p.
12. ГОСТ 7.1–2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Введ. 2004-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2004. – 54 с.

Струсевич С.К.
студент
Санкт-Петербургский колледж телекоммуникаций им. Э.Т. Кренкеля
Россия, Санкт-Петербург
sstrusevich@list.ru
Кривоносова Н.В.
начальник отдела развития профессиональных компетенций
Санкт-Петербургский колледж телекоммуникаций им. Э.Т. Кренкеля
Россия, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

Аннотация. В современных условиях промышленного производства точность и достоверность результатов измерений становятся ключевыми факторами обеспечения конкурентоспособности предприятия. Переход к концепции Индустрии 4.0 подразумевает глубокую цифровизацию всех этапов контроля качества, однако на практике многие компании сталкиваются с проблемой «человеческого фактора» и нарушением целостности данных при их передаче и обработке. Данная работа посвящена вопросам разработки специализированного программного обеспечения, минимизирующего риски искажения измерительной информации. В статье рассматриваются архитектурные подходы к построению систем сбора данных, основанные на принципах автоматического импорта информации с первичных датчиков и приборов. Анализ программных методов валидации данных, механизмы предотвращения несанкционированного доступа и алгоритмы формирования неизменяемых журналов аудита. Описанные решения позволяют не только повысить точность измерений за счет исключения ошибок ручного ввода, но и обеспечить полную прослеживаемость жизненного цикла каждого измерения. Внедрение предложенных подходов способствует созданию прозрачной цифровой среды управления качеством, соответствующей международным стандартам. Работа представляет интерес для разработчиков промышленного ПО, инженеров по качеству и специалистов в области автоматизации производственных процессов.

Ключевые слова: цифровизация, контроль качества, целостность данных, автоматизированные системы, разработка ПО, архитектура данных, валидация, прослеживаемость, промышленная автоматизация.

Strusevich S.K.
Student
E.T. Krenkel Saint Petersburg College of Telecommunications
Russia, Saint Petersburg
sstrusevich@list.ru
Krivonosova N.V.
Head of the Professional Competence Development Department
E.T. Krenkel Saint Petersburg College of Telecommunications
Russia, Saint Petersburg

DEVELOPMENT OF SOFTWARE SOLUTIONS FOR ENSURING THE RELIABILITY AND INTEGRITY OF DATA IN AUTOMATED QUALITY CONTROL SYSTEMS

Abstract. In modern industrial production, the accuracy and reliability of measurement results are becoming key factors in ensuring an enterprise's competitiveness. The transition to the

Industry 4.0 concept implies deep digitalization of all stages of quality control; however, in practice many companies face the problem of the «human factor» and violations of data integrity during its transmission and processing. This work is devoted to the development of specialized software that minimizes the risk of distorting measurement information. The article examines architectural approaches to building data-collection systems based on the principles of automatic import of information from primary sensors and instruments, analyses software methods of data validation, mechanisms for preventing unauthorized access, and algorithms for forming immutable audit logs. The described solutions make it possible not only to improve measurement accuracy by eliminating manual-entry errors, but also to ensure full traceability of each measurement's life cycle. Implementation of the proposed approaches contributes to creating a transparent digital quality-management environment that complies with international standards. The work is of interest to industrial software developers, quality engineers and specialists in the automation of production processes.

Keywords: digitalization, quality control, data integrity, automated systems, software development, data architecture, validation, traceability, industrial automation.

Сегодня требования к точности данных на производстве постоянно растут. Старые методы контроля, когда результаты записываются вручную в журналы или Excel, уже неэффективны. Главная проблема здесь – человеческий фактор: риск случайных опечаток или преднамеренного искажения цифр.

Целостность данных – это гарантия того, что информация останется точной и полной на всех этапах – от замера прибором до итогового отчета. Однако разработка таких систем осложняется тем, что нужно объединять разное оборудование в одну сеть и обеспечивать безопасность хранения больших объемов данных.

Цель работы – спроектировать архитектуру системы, которая будет автоматически собирать и проверять результаты измерений почти без участия человека.

Чтобы повысить точность измерений, нужно переходить от ручной записи к автоматическому мониторингу в единой цифровой среде. В основе данной работы лежит интеграция измерительных приборов с программным комплексом. Этот софт берет на себя проверку и защиту данных на каждом этапе.

Архитектурное построение системы

Предлагается использовать многоуровневую архитектуру. Это позволит разделить задачи: работа с «железом» будет отделена от хранения и визуализации данных. Такая модель надежнее и позволяет легко добавлять новые приборы в будущем.

Первый уровень (Интерфейсный): отвечает за связь с датчиками. Здесь работают программные шлюзы на языке Python. Они опрашивают порты (RS-232, USB) или считывают данные по сетевым протоколам (например, Modbus TCP).

Второй уровень (Обработка): здесь работает бизнес-логика. Система получает «сырые» пакеты данных, переводит их в удобный формат и проверяет на ошибки.

Третий уровень (Хранение): данные записываются в реляционную базу под управлением СУБД PostgreSQL.

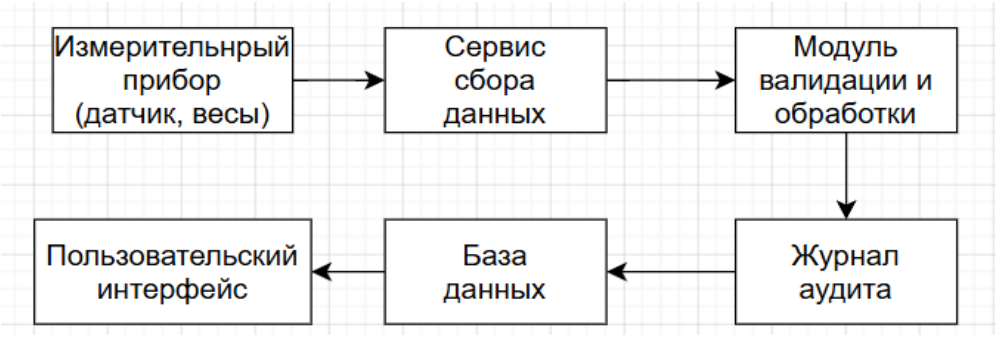


Рис. 1. Архитектурная модель интеграции оборудования в цифровую среду управления качеством

Программные методы автоматизации сбора данных

Главная задача софта – не дать пользователю изменить данные во время их передачи в базу. Для этого используется паттерн «Адаптер». Он преобразует сигнал от прибора в стандартный объект данных.

Программа работает по событиям: как только прибор зафиксировал стабильный результат (например, вес на весах), драйвер тут же перехватывает его и отправляет на сервер. Оператор не участвует в этом процессе, поэтому он не сможет выбрать «лучшее» значение или ошибиться при вводе цифр.

Реализация алгоритмов валидации и прослеживаемости

Для обеспечения соответствия принципам целостности данных, в программный код модуля обработки внедрены процедуры многоуровневой валидации.

Проверка метаданных: система автоматически прикрепляет к каждому значению уникальный идентификатор прибора и проверяет срок действия его последней калибровки по базе данных метрологического учета. Если срок поверки истек, программа блокирует прием данных и уведомляет администратора.

Логический фильтр: алгоритм сравнивает полученный результат с заданными технологическими границами (номинал ± допуск). В случае выхода за границы, запись помечается специальным флагом Is_Out_Of_Control, но не удаляется, что критически важно для анализа причин брака.

Листинг 1. Пример реализации функции первичной обработки замера:

```
def process_incoming_measurement(device_data):
 # Автоматическая фиксация времени получения данных сервером
 server_time = datetime.utcnow()
 # Парсинг значения и проверка его физической корректности
 raw_val = parse_device_signal(device_data)
 if raw_val is None or raw_val < 0:
     return handle_error(«Invalid signal detected»)
```

```
# Формирование защищенного пакета данных
measurement_record = {
    «value»: raw_val,
    «timestamp»: server_time,
    «device_id»: device_data.get_serial(),
    «hash»: generate_sha256(raw_val, server_time)
}
return db_secure_insert(measurement_record)
```

Проектирование защищенного хранилища

Особое внимание в методологии уделено реализации «Журнала аудита». В рамках данной работы структура базы данных была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить невозможность бесследного удаления информации.

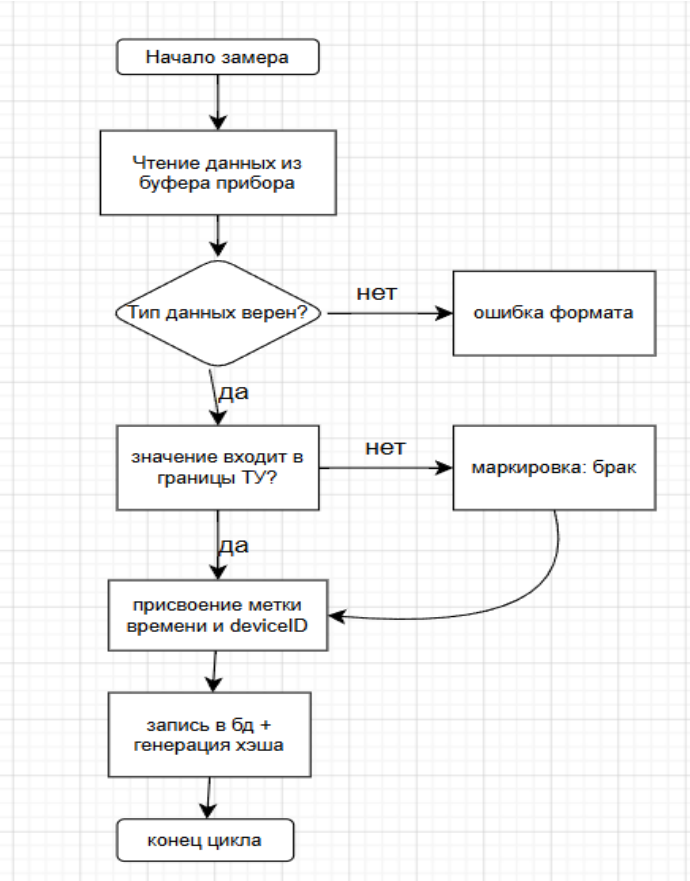


Рис. 2. Логическое проектирование структуры данных для обеспечения прослеживаемости

Каждая запись в таблице результатов снабжается контрольной суммой, вычисляемой на основе комбинации самого значения, времени записи и ID оператора. При попытке несанкционированного изменения данных через консоль СУБД, хэш-сумма перестанет совпадать, и система мгновенно выдаст предупреждение о нарушении целостности архива. Такой подход превращает базу данных в «черный ящик», которому можно полностью доверять при проведении внешних аудитов качества.

Инструменты оперативного мониторинга

Для удобства добавлен модуль дашбордов. В отличие от обычных отчетов, цифровой интерфейс показывает графики в реальном времени. Специалисты могут заметить тренды (например, когда значения начинают медленно ползти к границе брака) и заранее подстроить оборудование.

Основной задачей было проверить, насколько внедрение автоматизированного сбора данных реально снижает нагрузку на персонал и повышает достоверность измерений по сравнению с традиционным ручным вводом.

Сравнительный анализ эффективности

В ходе тестирования были замерены временные затраты на обработку контрольных партий изделий. Результаты сравнения ручного процесса и работы через разработанное ПО сведены в таблицу 1.

Таблица

Сравнение показателей до и после внедрения системы

Параметр оценки	Ручной ввод данных (Excel/Бумага)	Автоматизированный сбор (ПО)
Время на регистрацию 10 замеров	~ 5–7 минут	< 20 секунд
Вероятность ошибки (опечатки)	2–4% случаев	0%
Скорость формирования отчета	Ручная сборка (до 1 часа)	Автоматически (мгновенно)
Доступ к истории изменений	Затруднен или отсутствует	Полный (через Audit Trail)

Как видно из таблицы, главное преимущество – это полная ликвидация случайных опечаток. Программа берет данные прямо из памяти прибора, поэтому риск того, что человек перепутает цифры или неверно поставит запятую, равен нулю.

Анализ работы системы защиты данных

Чтобы проверить надежность, были специально изменены результаты прямо в базе данных, минуя интерфейс программы. Алгоритм хеширования сработал корректно: при следующей проверке система увидела, что контрольные суммы не совпадают, и пометила эти записи как недостоверные. Это подтверждает, что данные в системе защищены от тайных исправлений.

Выявленные ограничения

Во время работы столкнулись с одной проблемой: не всё оборудование на предприятии современное. У старых приборов нет цифровых выходов (USB или COM-портов). Чтобы подключить их в будущем, придется либо использовать специальные контроллеры, либо настраивать систему распознавания текста (OCR) для считывания цифр прямо с экранов приборов.

В данной статье описана архитектура ПО, которое автоматизирует сбор измерений и защищает их от подделки. Удалось создать модульную систему, к которой можно подключать разные приборы для мониторинга качества.

Основные выводы:

1. Автоматизация не только ускоряет регистрацию замеров, но и гарантирует их точность, исключая ошибки ручного ввода.

2. Использование журнала аудита и хеширования данных создает защищенную среду. Это повышает доверие к результатам контроля со стороны руководства и заказчиков.

3. Система позволяет перейти от простого хранения цифр к их анализу в реальном времени.

Практическая польза системы в том, что её модули можно внедрять на реальных участках производства уже сейчас. В будущем можно добавить в софт элементы аналитики, чтобы программа могла предсказывать возможные поломки оборудования на основе истории его работы.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015.
2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2019.
3. Мартин, Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. – СПб.: Питер, 2018. – 352 с.
4. Клеппманн, М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка. – СПб.: Питер, 2018. (В контексте хранения данных и транзакций).
5. Куприяновский, В. П. и др. Целостность данных в цифровом производстве // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5. – № 10,
6. Гамма, Э., Хелм, Р. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб.: Питер, 2020, (В контексте паттерна «Адаптер»).
7. IEEE 802.3-2022. Стандарт для передачи данных в промышленных сетях.
8. Макаров, В. В. Автоматизация измерений, контроля и испытаний. – М.: Академия, 2012.

Расторгуев А.А.
аспирант
РГУ им. А.Н. Косыгина
Россия, Москва
rostx12345@yandex.ru

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СИЗ НА ОСНОВЕ СКВОЗНОГО КОНТРОЛЯ, СТАТИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ И ВНУТРЕННЕГО АУДИТА В ЦИФРОВОЙ СРЕДЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация. В статье рассматривалась проблема обеспечения качества средств индивидуальной защиты (СИЗ), обусловленная традиционной организацией контроля как финальной операции и отсутствием единой информационной среды для управления данными о качестве на всех этапах жизненного цикла изделия. Целью работы являлась разработка комплексного метода управления качеством, объединяющего сквозной неразрушающий контроль (НК), статистическое управление процессами и внутренний аудит в

цифровом пространстве предприятия. Объектом исследования выступает процесс производства защитного комбинезона, включающий этапы входного контроля материалов, автоматизированного раскроя, пошива сборочных единиц и выходного контроля готовых изделий. В работе предложена трехуровневая модель управления качеством: технический контур – интеграция методов НК (машинное зрение, тепловизионный контроль, контроль сварных швов, 3D-сканирование, гравиметрия) в технологический процесс по логике
«вход → изготовление → выход»; статистический контур – анализ стабильности процессов на основе данных НК с использованием контрольных карт Шухарта, индексов воспроизводимости C_p и C_{pk}, анализа Парето; организационный контур – проведение внутренних аудитов процессов для оценки удовлетворенности участников и выявления возможностей постоянного улучшения. Показана архитектура интеграции методов с CAD-системой, PLM-системой, MES и ERP, обеспечивающая единое информационное пространство организации. Особенностью подхода являлась создание комплексного трехконтурного метода управления качеством, адаптированного к специфике швейного производства СИЗ и реализованного в цифровой среде предприятия. Практическая значимость предложенного метода в возможности перехода от финальной отбраковки к предиктивному управлению качеством и постоянному совершенствованию системы менеджмента качества.

Ключевые слова: управление качеством, средства индивидуальной защиты, неразрушающий контроль, статистическое управление процессами, внутренний аудит, цифровизация, PLM-система, ERP-система, машинное зрение, сквозной контроль, контрольные карты.

Rastorguev A.A.
Postgraduate Student,
The Kosygin State University of Russia
Russia, Moscow
rostx12345@yandex.ru

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED QUALITY MANAGEMENT METHOD FOR PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT BASED ON IN-PROCESS INSPECTION, STATISTICAL PROCESS CONTROL AND INTERNAL AUDIT IN THE DIGITAL ENTERPRISE ENVIRONMENT

Abstract. The article addresses the problem of ensuring the quality of personal protective equipment (PPE), caused by the traditional organization of control as a final operation and the lack of a unified information environment for managing quality data at all stages of the life cycle. The aim of the work is to develop an integrated quality management method combining in-process non-destructive testing (NDT), statistical process control and internal audit in the digital enterprise space. The object of the study is the production process of a protective overalls, including the stages of incoming inspection of materials, automated cutting, sewing of assembly units and final inspection of finished products. A three-level quality management model is proposed: the technical circuit – integration of NDT methods (machine vision, thermal imaging control, welded seam control, 3D scanning, gravimetry) into the technological process according to the
«input → manufacturing → output» logic; the statistical circuit – analysis of process stability based on NDT data using Shewhart control charts, capability indices C_p and C_{pk}, Pareto analysis; the organizational circuit – conducting internal process audits to assess participant satisfaction and identify opportunities for continuous improvement. The architecture for

integrating these methods with CAD, PLM, MES and ERP systems is shown, providing a unified information space. The scientific novelty lies in the creation of a comprehensive three-circuit quality management method adapted to the specifics of PPE garment production and implemented in the digital enterprise environment. The practical significance consists in the possibility of transitioning from final rejection to predictive quality management and continuous improvement of the quality management system.

Keywords: quality management, personal protective equipment, non-destructive testing, statistical process control, internal audit, digitalization, PLM system, ERP system, machine vision, in-process inspection, control charts.

Современные требования к системам менеджмента качества в условиях цифровой трансформации промышленности диктуют необходимость перехода от контроля конечного продукта к управлению качеством на всех этапах жизненного цикла изделия [1]. Особую актуальность это приобретает для предприятий легкой промышленности, выпускающих средства индивидуальной защиты (СИЗ), где цена несоответствия может быть связана с риском для жизни и здоровья пользователя.

Традиционная организация технического контроля на швейных предприятиях характеризуется рядом системных проблем. Контроль качества, как правило, вынесен на финальные операции и осуществляется визуально-измерительными методами с низкой степенью автоматизации [2]. Это приводит к тому, что выявление дефектов происходит уже после выполнения всех технологических операций, когда затраты на исправление максимальны, а управляющее воздействие на процесс невозможно.

Внедрение методов неразрушающего контроля (НК), интегрированных в технологический процесс, позволяет сместить акцент с констатации брака на его предотвращение [3]. Однако, получение первичных данных о качестве само по себе не обеспечивает устойчивого улучшения. Требуется их статистическое осмысление для выявления трендов и предупреждения разладок, а также организационная обратная связь – внутренние аудиты, оценивающие эффективность самой системы и удовлетворенность участников.

Целью данной работы является разработка комплексного метода управления качеством, объединяющего сквозной неразрушающий контроль (логика «вход → изготовление → выход»), статистическое управление процессами и внутренний аудит в едином цифровом пространстве предприятия на базе CAD/PLM/ERP-систем.

Теоретической базой исследования послужили работы в области управления качеством [4, 5, 6], неразрушающего контроля, статистических методов, цифровизации производственных процессов [9, 10], а также нормативные документы, регламентирующие качество продукции [11, 12].

В качестве методологической основы использован системный подход, рассматривающий управление качеством как трехуровневую иерархическую систему:

- технический уровень: интеграция методов НК в технологический процесс;

- статистический уровень: анализ данных НК с использованием контрольных карт, индексов пригодности, диаграммы Парето [7, 8];

- организационный уровень: внутренние аудиты процессов и оценка удовлетворенности участников.

Результаты исследования

1. Логика сквозного контроля по этапам «вход → изготовление → выход»

Предлагаемая концепция базируется на принципе «качество встроено в процесс» и реализует сквозной контроль по схеме, представленной на рисунке 1. Технологический процесс производства комбинезона разделен на четыре макроэтапа, каждому из которых соответствует свой контур контроля.

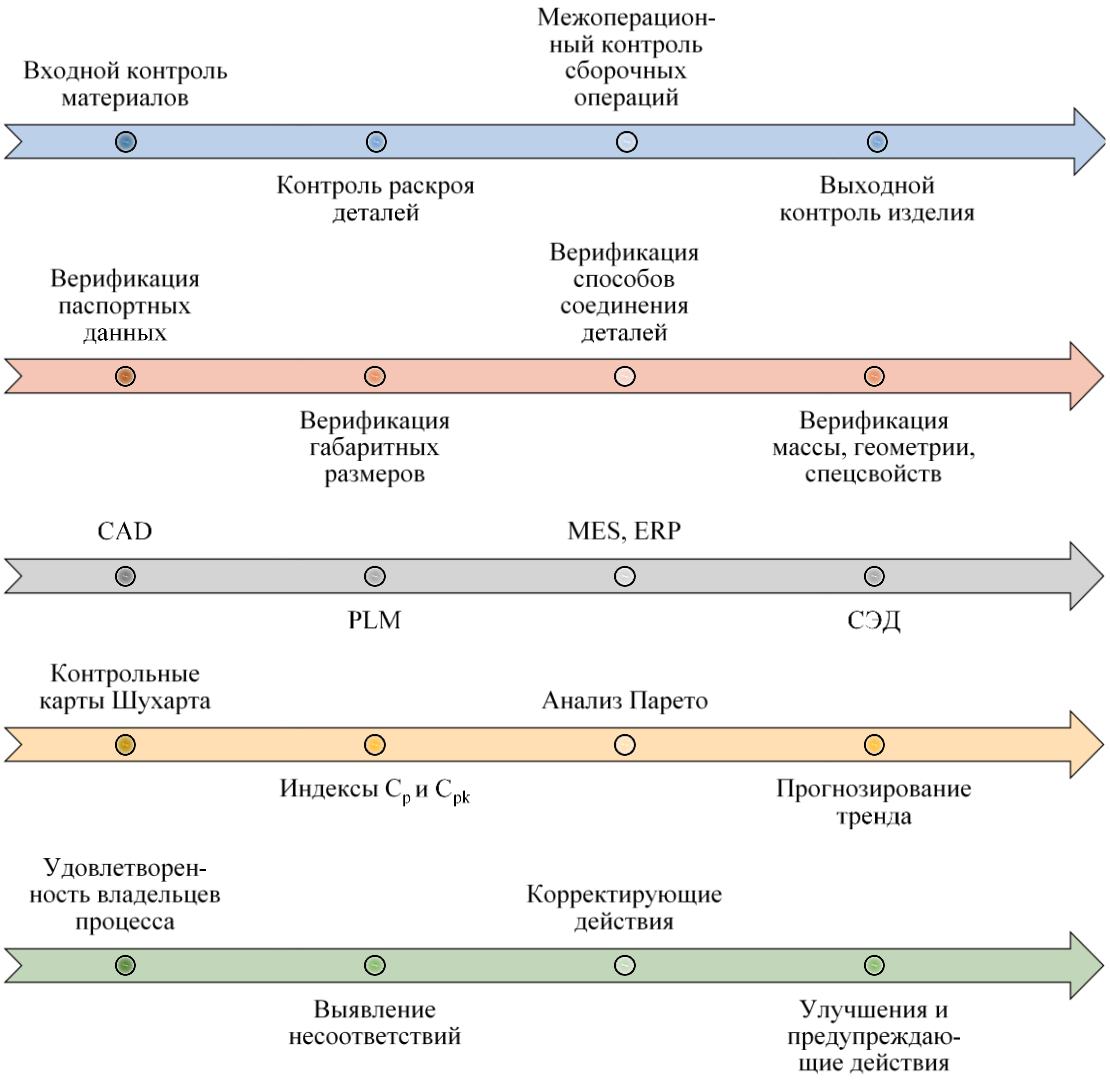


Рис. 1. Схема сквозного контроля качества, интегрированного с технологическим процессом изготовления СИЗ

2..Методы неразрушающего контроля на этапах производства

В таблице 1 систематизированы методы НК, предлагаемые для каждого этапа, а также показана их интеграция с информационными системами организации (ИС).

Таблица 1

Матрица методов НК и их интеграции в сквозном процессе

Этап	Объект контроля	Метод (способ) НК	Контролируемые параметры	Интеграция с ИС
Вход	Ткань (рулон)	Оптический	Перекос нитей, нарушение переплетения, неоднородность рисунка	PLM (эталонный спектр) → визуализация → ERP (блокировка приемки)
	Утеплитель	Тепловизор	Равномерность распределения волокон, зоны пониженной плотности	PLM (карта плотности материала)
Раскрой	Детали кроя	Машинное зрение (контур детали)	Соответствие контура электронному макету, наличие надсечек	CAD (эталон) → MES (подтверждение)
Пошив	Ниточные швы	Оптические датчики, мини-камеры	Пропуски стежков, ровнота строчки	MES → PLM (атрибуты единицы)
	Сварные швы (для ПВХ/мембран)	Светопроница-емость	Качество сварки (корреляция с прочностью)	MES → PLM (параметры шва)
Сборка	Сборочные единицы (рукава, полочки и т.д.)	Машинное зрение (геометрия сборки)	Симметричность, посадка, расположение карманов	PLM (эталонное изображение) → MES (стоп-сигнал)
Выход	Готовое изделие	3D-сканирование, фото	Соответствие размерной сетке, перекосы	CAD (цифровой двойник) → ERP (учет)
		Гравиметрия	Соответствие теоретической массе	CAD (расчетная масса) → ERP (статус партии)

3 Статистическое управление процессами на основе данных НК

Данные, генерируемые системой НК, поступают в реальном времени в статистический модуль (встроенный в PLM или MES). Это позволяет реализовать следующие инструменты:

1) Контрольные карты Шухарта. Для каждого критического параметра (например, прочность ниточного шва, отклонение геометрии детали) строятся карты индивидуальных значений и скользящих размахов [13]. При приближении процесса к границам регулирования система автоматически отправляет предупреждение мастеру и начальнику отдела управления качеством.

2) Индексы пригодности процессов C_p и C_{pk}. На основе накопленных данных за смену/неделю рассчитываются индексы, позволяющие оценить, способен ли процесс стабильно выпускать продукцию в заданном допуске.

3) Анализ Парето. По каждой операции автоматически формируется диаграмма Парето, выявляющая основные виды дефектов. Это позволяет целенаправленно направлять усилия на улучшение.

Рассмотрим пример. При контроле прочности сварных швов комбинезона методом светопроницаемости (с установленной в нормативной документации корреляции с прочностью) данные о каждом шве поступают в статистический модуль. В таблице 2 представлен пример полученных данных, а на рисунке 2 представлена контрольная карта средних значений.

Таблица 2

Данные для построения контрольной карты по средним значениям

Группа данных	Значения данных (прочность шва на разрыв, Н)					$\bar{x}$	R	CL	$\bar{R}$	UCL ($CL+A_2\bar{R}$)	LCL ($CL-A_2\bar{R}$)
1	39	37	35	44	36	38,2	9	39,68	11	46,027	33,333
2	36	36	43	44	31	38,0	13				
3	41	32	32	46	44	39,0	14				
4	43	37	40	33	35	37,6	10				
5	46	50	42	41	49	45,6	9				
Примечание – $\bar{x}$ – среднее, R – размах, CL – общее среднее, $\bar{R}$ – средний размах, UCL – верхняя контрольная граница, LCL – нижняя контрольная граница, значение A_2 для пяти значений в группе согласно ГОСТ Р ИСО 7870-2 равно 0,577.											

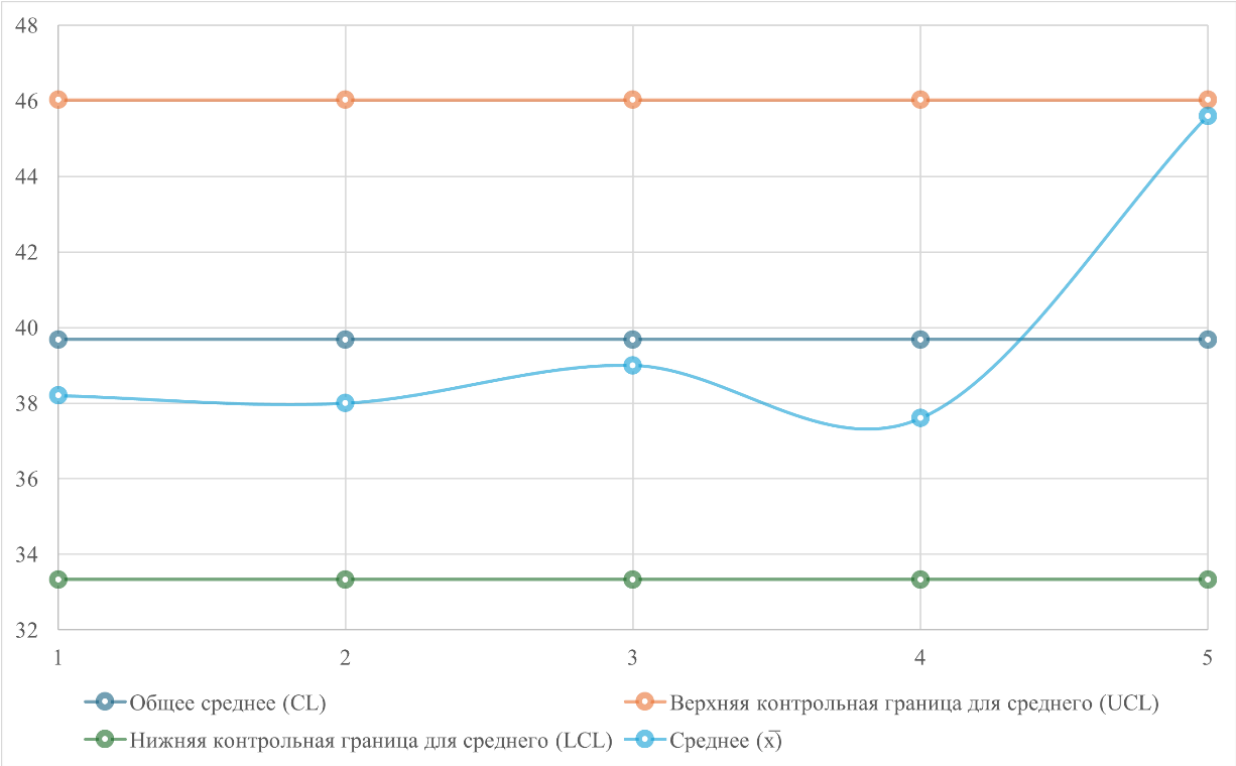


Рис. 2. Контрольная карты средних значений

При получении таких данных необходимо констатировать, что процесс находится в статистически неуправляемом состоянии, так как значение среднее значение из 5-й группы практически достигает верхней контрольной границы. Несмотря на то, что точка формально находится внутри границ, резкий скачок среднего значения в 5-й группе указывает на появление особой причины вариабельности. Следует провести анализ причин резкого роста показателей в 5-й группе (проверить сырье, настройку оборудования, соответствие технологическим режимам и т.п.) с целью выработки корректирующих и предупреждающих мероприятий.

На основе данных, полученных в рассмотренном ранее примере (таблица 2), рассчитаем коэффициенты воспроизводимости, а также дополнительные статические показатели для полноты оценки данных. В таблице 3 представлены полученные результаты.

Таблица 3

Коэффициенты воспроизводимости и прочие статистические данные

σ $\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right)$	σ^2	CV $\left(\frac{\sigma}{CL}100\%\right)$	C_p $\left(\frac{UCL-LCL}{6\sigma}\right)$	C_{pk} $min\left(\frac{UCL-CL}{3\sigma}\right);\left(\frac{CL-LCL}{3\sigma}\right)$		Z $\left(\frac{UCL-CL}{\sigma}\right)$
4,73	22,36	11,92	0,447	0,447	0,447	1,342
Примечание – σ – среднеквадратичное отклонение, значение d_2 для пяти значений в группе согласно ГОСТ Р ИСО 7870-2 равно 2,326, σ^2 – дисперсия, CV – среднеквадратичное отклонение, C_p – потенциальная воспроизводимость, C_{pk} – фактическая воспроизводимость, Z – процент брака (нормальное распределение для 1,34 составляет 0,90988 по ГОСТ Р 50779.21 (1 – 0,90988 = 0,09012 или 9,012%), при условии симметрии нормального распределения 9,012 * 2 = 18,024%.						

Полученные данные таблицы 3 позволяют сделать следующие выводы:

- среднеквадратичное отклонение 11,92% свидетельствует о том, что процесс имеет заметный разброс (повышенную степень изменчивости);

- равенство коэффициентов C_p и C_{pk} указывает что оборудование максимально отлажено и на образование возможных дефектов не оказывает влияния, однако при условии, что значение коэффициентов меньше 1, процесс нестабилен;

- при Z 1,34 вероятность выхода за границу допустимого составляет 9%, а общий ожидаемый уровень брака составляет 18%, что является значительным, почти критическим (практически каждое пятое изделие содержит брак);

- основной причиной брака является разброс (нестабильность) процесса.

Для анализа Парето предположим, что по результатам месячной работы предприятия, были выявлены дефекты, указанные в таблице 4, а на рисунке 3 представлен пример полученной диаграммы (гистограммы) Парето.

Основываясь на полученных данных таблицы 4 и рисунка 3 можно сделать вывод о том, что основным дефектом является пропуск стежка, составляющий более трети всех случаев (35,6%).

Таблица 4

Данные по дефектам за месяц

Вид дефекта	Количество, шт.	Накопленная сумма	Накопленный процент,%
Пропуск стежка	48	-	35,6
Неровная строчка	32	80	59,3
Перекос детали	20	100	74,1
Нарушение сварного шва	15	115	85,2
Несоответствие цвета	10	125	92,6
Прочие	10	135	100

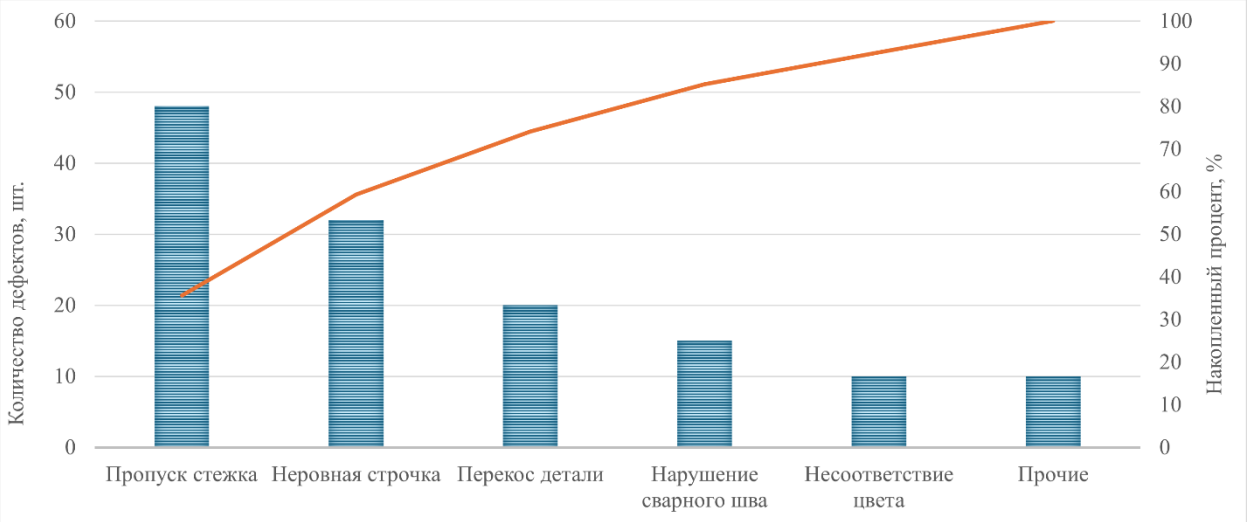


Рис. 3. Пример диаграммы (гистограммы) Парето

Первые три категории (пропуск стежка, неровная строчка и перекос детали) суммарно дают 74,1% всех дефектов. Это проблемы, на которых стоит сосредоточить внимание в первую очередь. Устранение двух первых дефектов (пропуск стежка и неровная строчка) позволит сократить общий брак почти на 60%. В качестве оперативных корректирующих и предупреждающих действий для решения описанных проблем, можно выделить наиболее эффективные:

- проверку соответствия игл и ниток требованиям технической документации;
- проверку соответствия натяжения швейных нитей требованиям технической документации;
- проверку исправности системы продвижения (зубчатой рейки) ткани;

- внедрение графика ежедневного технического обслуживания перед работой;

- использование средств малой механизации – ограничителей лапок и направляющих для контроля ширины шва.

Основные усилия нужно направить на проверку швейного оборудования и квалификацию швей, так как подавляющее большинство дефектов в рассматриваемом примере связано именно с процессом пошива, а не с материалами или сваркой.

4 Внутренний аудит как инструмент обратной связи и постоянного улучшения

Третий контур предлагаемого метода – это внутренние аудиты, направленные на оценку не только соответствия, но и эффективности внедренной системы, а также удовлетворенности участников процесса [14].

Объектами аудита являются:

- процессы: сквозной процесс «Разработка и производство», процесс входного контроля, процесс пошива и т.д.

- удовлетворенность участников: конструкторы (видят ли обратную связь по качеству своих разработок?), операторы швейных автоматов (не создает ли система контроля излишней нагрузки?), технологи (достаточно ли данных для анализа?).

Инструменты аудита являются:

- опросные листы (в том числе в электронной форме с интеграцией в PLM).

- анализ записей о качестве (данных НК, статистических отчетов).

- наблюдение за ходом процесса.

Интеграция с цифровой средой:

- результаты аудитов (выявленные несоответствия, предложения по улучшению, оценка удовлетворенности) вносятся в PLM-систему или систему электронного документооборота в виде задач на корректирующие и предупреждающие действия. Тем самым создается «цифровой след» работы системы менеджмента качества, а все улучшения прослеживаются от момента выявления до внедрения.

5 Архитектура интеграции в едином информационном пространстве

Предлагаемая трехуровневая система базируется на следующей архитектуре:

1. CAD-система – формирование эталонных геометрических моделей, расчет теоретической массы, определение контролируемых зон.

2. PLM-система – центральное хранилище эталонных характеристик (спектры тканей, образцы швов, допуски), управление требованиями, привязка протоколов НК и результатов аудитов к конкретным изделиям и партиям.

3. MES-система – сбор данных с контрольно-измерительного оборудования в реальном времени, реализация статистических алгоритмов, остановка процесса при критических отклонениях.

4. ERP-система – планирование ресурсов для контроля, учет годной и бракованной продукции, формирование статистической отчетности, интеграция с результатами аудитов для распределения ресурсов на улучшения.

Предлагаемый комплексный метод обеспечивает синергетический эффект за счет объединения трех контуров управления, которые традиционно существуют разрозненно. В таблице 5 представлено сравнение традиционного и предлагаемого методов.

Таблица 5

Сравнение традиционного и предлагаемого методов

Характеристика	Традиционный подход (контроль на выходе)	Предлагаемый комплексный метод
Обнаружение дефектов	На финальной стадии, после изготовления	На ранних стадиях, в процессе производства
Реакция на отклонения	Констатация брака, переделка	Предупреждение разладки процесса
Использование данных	Разрозненные протоколы ОТК	Единая база данных в PLM/ERP
Обратная связь	Отсутствует или неформальная	Системные аудиты и корректирующие действия
Возможность прогнозирования	Отсутствует	Прогнозирование трендов по контрольным картам
Удовлетворенность персонала	Не оценивается	Регулярная оценка и учет предложений

Предлагаемый метод позволяет создать целостный трехуровневый метод управления качеством, адаптированный к специфике швейного производства СИЗ и в разработке модели его реализации в цифровой среде предприятия на базе CAD/PLM/ERP/MES, вписывается в логику активно развивающейся нормативной базы цифровизации [15], а также имеет следующую конкретную практическую значимость:

- перейти от финальной отбраковки к предиктивному управлению качеством;
- повысить обоснованность управленческих решений за счет статистического анализа данных НК;
- обеспечить замкнутый цикл улучшений (PDCA) через внутренние аудиты;
- создать прозрачную и управляемую систему качества, отвечающую требованиям современных стандартов.

В результате проведенного исследования разработан комплексный метод управления качеством средств индивидуальной защиты, интегрирующий сквозной неразрушающий контроль (по логике «вход – изготовление – выход»), статистическое управление процессами и внутренний аудит в едином цифровом пространстве предприятия.

Предложенная трехуровневая модель позволяет:

• получать объективные данные о качестве на всех этапах производства;

• своевременно выявлять тренды ухудшения качества и предотвращать появление брака;

• оценивать эффективность системы менеджмента качества и удовлетворенность участников процессов;

• обеспечивать постоянное улучшение на основе замкнутого цикла PDCA.

Дальнейшие направления исследований могут быть связаны с разработкой методик калибровки средств НК для новых типов материалов, созданием алгоритмов машинного обучения для прогнозирования качества на основе накопленных данных, а также углубленное исследование влияния организационных факторов (результатов аудитов) на эффективность системы управления качеством.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 32 с. – Текст : непосредственный.
2. Рогожина, Ю.В. Разработка метода контроля качества швейных изделий машинным зрением : специальность 2.6.16 «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина. – Москва, 2024. – 216 с.
3. Бегмырадов Х., Бекиева М., Чарыев Т. Цифровизация и автоматизация технологических процессов: новые горизонты для промышленности // IN SITU. – 2024. – № 11 С. 56–58.
4. Полянсков Ю.В., Кондратьева А.С., Черников М.С., Блюменштейн А.А. Интеграция CAPP-, PDM-, ERP-систем в единое информационное пространство производственного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – № 4–3 С. 628–633.
5. Порсев К.И., Иванова В.А. Разработка модели информационного обеспечения службы стандартизации на машиностроительном предприятии на основе PLM-системы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12 С. 61–63
6. Серов Р.В., Серова Е.М., Бобрышева Г.В. Оптимизация бизнес-процессов предприятия посредством внедрения ERP-системы // Вестник Пензенского государственного университета. – 2025. – № 2 (50) С. 98–101.
7. Уилер, Д. Статистическое управление процессами: Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Дональд Уилер, Дэвид Чамберс ; перевод с английского. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2025. – 410 с.
8. Миттаг, Х. Статистические методы обеспечения качества / Х. Миттаг, Х. Ринне ; перевод с немецкого. – Москва : Машиностроение, 1995. – 616 с.
9. Яковлев Н.Б. Модели управления качеством на основе больших данных и машинного обучения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 8 С. 74–80.
10. Савич Е.К. Цифровой инструментарий управления качеством на этапах жизненного цикла продукции // Омский научный вестник. – 2025. – № 3 (195) С. 19–26.

11. ГОСТ 15.007-88. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция легкой промышленности. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 7 с.

12. ГОСТ Р 57632-2017. Материалы нетканые для специальной одежды. Утеплители. Технические требования. Методы испытаний – Москва: Стандартинформ, 2017. – 19 с.

13. ГОСТ Р 50779.42-99 (ИСО 8258-91). Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 36 с.

14. Денисова Я.В., Сопин В.Ф., Качмаржик А.А. Построение инновационной СМК и её функционирование с использованием цифровой платформы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – № 1 (87) С. 483–489.

15. Строев А.А. Анализ нормативной базы цифровизации управления разработкой и производством высокотехнологичной продукции // Естественно-гуманитарные исследования. – 2022. – № 2 (40) С. 269–276.

Лопухина М.Б.
эксперт по цифровым стратегиям, ИИ-коммуникациям
и внедрению инновационных решений
в сфере образования, культуры и управления
ООО «1331»
Россия, Москва
Lopukhina.producer@gmail.com

РАСХОЖДЕНИЕ ВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА И ИИ КАК ФАКТОР РИСКА В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. В условиях цифровизации процессов управления качеством возрастает роль систем искусственного интеллекта в анализе и интерпретации визуальных данных. При этом оценка качества результатов таких систем зачастую основывается на их внешнем совпадении с человеческим восприятием, что создает риск некорректной интерпретации. В статье рассматривается расхождение механизмов восприятия человека и искусственного интеллекта как фактор риска в цифровых системах управления качеством. В качестве аналитического инструмента используются визуальные иллюзии, позволяющие выявить различия в принципах формирования визуальной реальности. Показано, что совпадение результатов между человеком и моделью не свидетельствует о сходстве механизмов обработки информации. Выделены специфические для искусственного интеллекта искажения, включая чувствительность к незначительным изменениям входных данных и генерацию уверенных, но некорректных интерпретаций. На основе анализа архитектур современных моделей и практического кейса из области генеративного продакшена предложен подход к выявлению расхождений восприятия как инструменту контроля качества. Полученные результаты демонстрируют необходимость перехода от оценки результата к анализу условий его формирования в цифровых системах.

Ключевые слова: управление качеством, искусственный интеллект, визуальное восприятие, иллюзии, интерпретируемость, цифровизация, надежность систем.

Lopukhina M.B.
Expert in digital strategies, AI communications
and the implementation of innovative solutions
in the fields of education, culture and governance

1331 LLC
Russia, Moscow
Lopukhina.producer@gmail.com

DIFFERENCES BETWEEN HUMAN AND AI PERCEPTION AS A RISK FACTOR IN DIGITAL QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS

Abstract. With the digitalisation of quality management processes, the role of artificial intelligence systems in the analysis and interpretation of visual data is increasing. However, the assessment of the quality of such systems' results is often based on their external similarity to human perception, which creates a risk of incorrect interpretation. This article examines the divergence between human and artificial intelligence perception mechanisms as a risk factor in digital quality management systems. Visual illusions are used as an analytical tool to identify differences in the principles underlying the formation of visual reality. It is shown that a match in results between a human and a model does not indicate similarity in information processing mechanisms. Distortions specific to artificial intelligence are highlighted, including sensitivity to minor changes in input data and the generation of confident but incorrect interpretations. Based on an analysis of the architectures of modern models and a practical case study from the field of generative production, an approach is proposed for identifying discrepancies in perception as a quality control tool. The results demonstrate the need to shift from evaluating the outcome to analysing the conditions under which it is formed in digital systems.

Keywords: quality management, artificial intelligence, visual perception, illusions, interpretability, digitalisation, system reliability.

Цифровизация процессов управления качеством сопровождается стремительным внедрением систем искусственного интеллекта в задачи анализа, интерпретации и генерации данных. Визуальные модели, включая системы компьютерного зрения и мультимодальные архитектуры, находят применение в промышленности, медицине, транспортных системах и креативных индустриях, обеспечивая автоматизацию операций, ранее требовавших экспертного участия. Расширение области применения ИИ приводит к смещению роли человека от непосредственного анализа к интерпретации результатов, сформированных алгоритмическими системами. [5, 6]

Данная проблема регулярно фиксируется в прикладной практике внедрения ИИ в креативных и корпоративных процессах, где визуальная или семантическая убедительность результата становится основанием для его принятия. В ряде проектов наблюдается расхождение между качеством представления и корректностью структуры, что требует пересмотра критериев оценки.

В данных условиях особую значимость приобретает проблема определения достоверности результатов и разработки критериев их приемки в системах управления качеством, получаемых с использованием ИИ. В прикладной практике их корректность часто оценивается через соответствие человеческим ожиданиям, визуальной убедительности или формальному сходству с эталонными примерами. Подобная стратегия носит ограниченный характер, поскольку не учитывает различия в принципах обработки ин-

формации. Человеческое восприятие опирается на контекст, опыт и способность к реконструкции недостающих элементов, тогда как модели ИИ функционируют преимущественно на основе статистических зависимостей, извлеченных из обучающих данных .[11, 13]

Недостаточность такого подхода подтверждается эмпирическими наблюдениями, в том числе в областях с повышенными требованиями к надежности. В исследованиях медицинской визуализации показано, что алгоритмы обработки изображений способны формировать правдоподобные результаты, содержащие несуществующие структуры или, напротив, исключающие реальные признаки заболевания. При этом итоговое изображение сохраняет визуальную целостность и может восприниматься как корректное. В ряде случаев подобные искажения проявляются в виде так называемых «галлюцинаций», когда модель добавляет диагностически значимые элементы, отсутствующие в исходных данных, что потенциально приводит к ошибочной клинической интерпретации. [15]

Показателен также зафиксированный случай, при котором в результате работы медицинской ИИ-системы была сгенерирована анатомическая структура, несуществующая в реальности («basilar ganglia»). Несмотря на некорректность содержания, результат выглядел правдоподобно и не был выявлен на этапе первичной проверки. Подобные ситуации демонстрируют, что убедительность представления может маскировать фундаментальные ошибки, возникающие на уровне формирования ответа.

Дополнительное усложнение связано с когнитивными особенностями пользователей. Исследования показывают, что специалисты и неспециалисты склонны воспринимать ответы ИИ как достоверные даже при наличии ошибок, что усиливает эффект автоматизационного доверия и снижает вероятность критической проверки. В результате внешняя согласованность ответа начинает подменять содержательную проверку его корректности. [12, 14]

Таким образом, формируется противоречие между внешней согласованностью результата и процессами его получения. Совпадение с ожиданиями не гарантирует адекватности интерпретации, что создает системный риск в контексте управления качеством, особенно в тех случаях, когда результаты ИИ непосредственно интегрируются в принятие решений.

В рамках настоящего исследования расхождение между человеческим и машинным восприятием рассматривается как самостоятельный фактор риска в цифровых системах управления качеством. В качестве аналитического инструмента используется концепция визуальных иллюзий, позволяющая выявить различия в принципах интерпретации данных. Такой подход обеспечивает переход от оценки итогового результата к анализу условий его формирования.

Целью статьи является выявление и систематизация расхождений между человеческим и машинным восприятием, а также оценка их влияния на процессы управления качеством в цифровых системах.

В контексте управления качеством данная проблема проявляется на этапах валидации, приемки и интерпретации результатов, получаемых с использованием ИИ. В отличие от традиционных систем, где критерии качества могут быть формализованы, в случае алгоритмических моделей возникает необходимость учета особенностей их внутренней логики, что требует пересмотра существующих процедур контроля. [16, 17]

Методологическая основа исследования сформирована на пересечении подходов, применяемых в области анализа визуального восприятия, теории интерпретируемости искусственного интеллекта и практик управления качеством в цифровых системах. В качестве ключевого аналитического инструмента используются визуальные иллюзии, позволяющие реконструировать принципы интерпретации визуальных данных в биологических и искусственных системах. Обращение к данному инструменту обусловлено тем, что иллюзорные эффекты являются проявлением внутренних механизмов работы системы и тем самым дают возможность косвенно анализировать структуру интерпретации без прямого доступа к ее внутреннему устройству. [1]

Исследование опирается на сравнительный подход, в рамках которого сопоставляются особенности человеческой и алгоритмической интерпретации визуальной информации. Человеческое восприятие рассматривается как контекстно-зависимый процесс, основанный на интеграции сенсорных данных, предшествующего опыта и ожиданий, что позволяет компенсировать неполноту и неоднозначность входного сигнала. В отличие от этого, современные модели искусственного интеллекта, включая сверточные нейронные сети, трансформерные архитектуры и визуально-языковые модели, формируют представления преимущественно на основе статистических зависимостей, извлеченных из обучающих выборок. Указанное различие задает предпосылки для возникновения систематических расхождений в интерпретации визуальных сцен (см. табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные характеристики восприятия

Критерий	Человек	Искусственный интеллект
Основа интерпретации	Контекст, опыт, ожидания	Статистические зависимости
Работа с неполнотой данных	Достраивание смысла	Чувствительность к входным данным
Устойчивость к шуму	Высокая	Низкая
Реакция на неоднозначность	Снижение уверенности	Сохранение уверенности
Источник ошибок	Перцептивные эвристики	Ограничения модели и данных
Интерпретация результата	Семантическая	Корреляционная

Теоретическая часть исследования базируется на анализе работ, посвященных как человеческим визуальным иллюзиям, так и особенностям функционирования современных архитектур компьютерного зрения. Классификация иллюзий по уровням обработки визуального сигнала – от низкоуровневых контрастных эффектов до высокоуровневых интерпретаций глубины и структуры – используется для обоснования того, что восприятие представляет собой активный процесс построения модели реальности. Параллельно рассматриваются ограничения архитектур ИИ, включая локальность вычислений в сверточных сетях, специфику механизма самовнимания в трансформерах и влияние языковой компоненты в мультимодальных системах, что позволяет выявить источники устойчивых искажений.

Отдельное внимание уделяется анализу частичных совпадений эффектов у человека и моделей ИИ. В ряде случаев алгоритмы демонстрируют реакции, внешне сходные с человеческими иллюзиями, что может быть связано как со сходством решаемых задач, так и с обучением на данных, отражающих человеческие оценки. Однако подобные совпадения интерпретируются как поверхностные и не затрагивающие глубинные принципы обработки информации. Для выявления принципиальных различий акцент смещается на анализ специфических для ИИ искажений, не имеющих прямых аналогов в человеческом восприятии, включая высокую чувствительность к незначительным изменениям входных данных, зависимость результатов от формулировки запроса и склонность к генерации уверенных, но некорректных интерпретаций.

Эмпирическая часть исследования основана на методе намеренного выявления расхождений между человеческой и машинной интерпретацией. Метод предполагает конструирование визуальных сценариев с повышенной степенью структурной неоднозначности, при которых различия в принципах анализа проявляются наиболее явно. Формируются изображения, обладающие высокой визуальной правдоподобностью при наличии скрытых нарушений в анатомии, физике объектов или пространственной логике сцены. Полученные результаты сопоставляются с реакцией человека и поведением модели, что позволяет фиксировать ситуации, в которых совпадение на уровне внешнего представления сопровождается расхождением на уровне структурной корректности.

Дополнительно применяется качественный анализ, направленный на систематизацию выявленных типов искажений и оценку их влияния на процессы управления качеством. В ходе анализа выделяются устойчивые паттерны ошибок, а также определяется их природа – адаптивная или неадаптивная с точки зрения задач интерпретации. Практическая значимость предложенного подхода заключается в возможности использования выявленных расхождений в качестве инструмента диагностики надежности систем искусственного интеллекта. Это позволяет перейти от проверки соответствия результата формальным критериям к анализу условий его формирования,

что является критически важным для обеспечения качества в цифровых системах.

Таким образом, предложенная методология объединяет теоретический анализ, сравнительный подход и эмпирическое наблюдение, обеспечивая комплексное рассмотрение проблемы расхождения интерпретаций и формируя основу для разработки практических инструментов контроля качества в системах с использованием искусственного интеллекта. В рамках исследовательской и продакшн-практики авторов данный подход был дополнительно применён к анализу генеративных визуальных систем, используемых в медиапроектах, что позволило выявить типовые сценарии расхождения интерпретации в условиях реальных задач. Это расширило эмпирическую базу исследования и обеспечило валидацию предложенного метода в прикладном контексте. В контексте управления качеством предложенный метод может быть интерпретирован как процедура стресс-тестирования моделей, направленная на выявление скрытых дефектов интерпретации, не обнаруживаемых стандартными метриками.

Проведенный анализ позволил выявить системные различия между человеческой и машинной интерпретацией визуальных данных, имеющие непосредственное влияние на процессы управления качеством в цифровых системах. Полученные результаты носят как теоретический, так и прикладной характер и позволяют уточнить ограничения существующих подходов к оценке корректности работы моделей искусственного интеллекта.

В ходе исследования установлено, что совпадение интерпретации между человеком и моделью возможно, однако носит ограниченный и нестабильный характер. В отдельных случаях алгоритмы демонстрируют реакции, внешне сходные с эффектами, наблюдаемыми в человеческом восприятии, включая искажения, связанные с контрастом, масштабом или структурой сцены. Подобные совпадения, как правило, обусловлены либо особенностями обучающих данных, отражающих человеческие перцептивные оценки, либо универсальными задачами интерпретации визуальной информации в условиях неопределенности. Вместе с тем, сопоставительный анализ показывает, что сходство результатов не сопровождается сходством механизмов их формирования, что исключает возможность прямого переноса критериев оценки корректности с человеческого восприятия на алгоритмические системы.

Ключевым результатом исследования является выявление специфических для искусственного интеллекта типов искажений, не имеющих прямых аналогов в человеческом восприятии. К ним относятся, прежде всего, высокая чувствительность к незначительным изменениям входных данных, при которой минимальные, визуально неразличимые модификации приводят к существенным изменениям интерпретации, а также склонность к генерации уверенных, но некорректных описаний. Дополнительно зафиксирована зависимость результатов от формулировки входного запроса в мультимодаль-

ных системах, что указывает на влияние языковых факторов на процесс интерпретации визуальной информации. Отдельную группу составляют нарушения структурной целостности, проявляющиеся в несоответствиях анатомии, физики объектов и пространственных связей, при сохранении общей визуальной правдоподобности изображения (см. табл. 2).

Таблица 2

Типы искажений и их влияние на качество

Тип искажения	Характеристика	Источник	Влияние на качество
Перцептивные иллюзии (человек)	Контекстные искажения	Особенности восприятия	Может улучшать интерпретацию
Pixel-level sensitivity (ИИ)	Реакция на микроскопические изменения	Архитектура модели	Высокий риск ошибок
Семантические галлюцинации	Уверенные, но неверные ответы	Недостаточный grounding	Критический риск
Языковая зависимость	Влияние формулировки запроса	Мультимодальные модели	Снижение надежности
Структурные ошибки	Нарушение логики сцены	Ограничения модели	Ошибки, не выявляемые автоматически

Систематизация выявленных искажений позволила выделить две принципиально различающиеся категории. Первая включает адаптивные искажения, которые в ряде случаев могут способствовать повышению эффективности интерпретации, аналогично человеческим перцептивным эвристикам. Вторая категория охватывает неадаптивные искажения, связанные с ограничениями архитектуры и обучающих данных, которые приводят к снижению надежности результатов и увеличению вероятности ошибок. Установлено, что именно вторая категория представляет наибольший риск для систем управления качеством, поскольку такие искажения не сопровождаются внутренними сигналами о некорректности результата.

Практическая часть исследования, основанная на анализе проектов генеративного продакшена, подтвердила выявленные закономерности. В процессе работы моделей наблюдалось устойчивое воспроизведение визуальных характеристик высокого уровня, включая стиль, композицию и эмоциональную выразительность сцены. Одновременно фиксировались систематические нарушения базовых структурных связей, выражающиеся в ошибках анатомии, некорректной физике объектов и нарушении пространственной логики. Существенным является то, что подобные несоответствия не влияли на общую визуальную убедительность результата и в ряде случаев оставались незамеченными при поверхностной оценке. Человеческий наблюдатель, обладающий контекстным пониманием, выявлял данные ошибки, тогда как модель не демонстрировала признаков неопределенности или снижения уверенности.

Подобные расхождения систематически наблюдаются в проектах генеративного продакшена, где визуальная убедительность становится критерием первичной приемки, несмотря на наличие структурных ошибок. Данный факт указывает на ограниченность существующих процедур контроля качества, ориентированных преимущественно на внешний результат.

Анализ полученных результатов позволяет зафиксировать ряд критических последствий для процессов управления качеством. Во-первых, визуальная или семантическая убедительность результата может приводить к его некритичному принятию, что повышает вероятность ложной валидации. Во-вторых, отсутствие встроенных механизмов самодиагностики в моделях затрудняет автоматическое выявление ошибок. В-третьих, зависимость интерпретации от внешних факторов, включая структуру входных данных и формулировку запроса, снижает воспроизводимость результатов. В совокупности данные факторы формируют устойчивую зону ошибок, связанную с подменой оценки корректности оценкой правдоподобия (см. табл. 3).

Таблица 3

Влияние особенностей ИИ на процессы качества

Особенность ИИ	Проявление	Риск для качества	Последствие
Визуальная правдоподобность	Ошибка маскируется	Ложная приемка	Снижение надежности
Отсутствие самодиагностики	Нет сигналов ошибки	Необнаруженные дефекты	Накопление ошибок
Зависимость от входных данных	Нестабильность	Невоспроизводимость	Потеря контроля
Уверенность при ошибке	Нет индикации риска	Ошибочные решения	Критические сбои

Мы видим необходимость в соотнощшении рассматриваемых в данной статье результатов и более широких изменений в путях взаимодействия человека и ИИ, при которых оценка качества всё же чаще опирается на убедительность представления, а не на анализ структуры формирования результата и степени его прозрачности. В этих условиях управление качеством требует перехода от проверки соответствия к проектированию условий интерпретации и валидации.

С точки зрения процессов управления качеством выявленные особенности требуют пересмотра критериев оценки результатов, включая внедрение процедур валидации, ориентированных на выявление структурных и логических несоответствий. В частности, становится недостаточным использование метрик, ориентированных на совпадение с эталонными данными или визуальную правдоподобность. Необходимым является включение про-

цедур, направленных на выявление структурных и логических несоответствий, а также анализ устойчивости результатов к изменениям входных данных.

Дополнительным результатом исследования является обоснование практического подхода к выявлению расхождений, основанного на целенаправленном конструировании визуальных сценариев с повышенной вероятностью возникновения ошибок. Применение данного подхода позволяет диагностировать ограничения моделей, выявлять скрытые несоответствия и формировать у специалистов навык критической интерпретации результатов. Использование расхождений в качестве диагностического инструмента расширяет возможности контроля качества и позволяет перейти от статической оценки результата к анализу поведения системы в различных условиях.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что расхождение между человеческой и машинной интерпретацией является не частным эффектом, а системной характеристикой современных моделей искусственного интеллекта. Данное положение имеет принципиальное значение, поскольку указывает на воспроизводимый характер расхождений, обусловленный различием в основаниях обработки информации. В этой связи расхождение восприятия должно интерпретироваться как фактор системного риска, требующий учета на уровне архитектуры процессов, включая разработку процедур верификации, ориентированных не на совпадение результата, а на анализ условий его формирования, устойчивости и интерпретируемости. Учет данного фактора требует пересмотра подходов к оценке качества и разработки методов, ориентированных на анализ устойчивости, интерпретируемости и надежности алгоритмических систем. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании цифровых систем управления качеством, ориентированных на работу с алгоритмическими моделями. Следовательно, предполагается переход от оценки соответствия результата заданным критериям к управлению процессом его формирования.

Список литературы

1. Amodei D., Olah C., Steinhardt J. et al. Concrete Problems in AI Safety // arXiv.org. – 2016. – URL: https://arxiv.org/abs/1606.06565 (дата обращения: 21.04.2026).

2. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A. et al. An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale // arXiv.org. – 2021. – URL: https://arxiv.org/abs/2010,11929 (дата обращения: 21.04.2026).

3. Finlayson S. G., Bowers J. D., Ito J. et al. Adversarial Attacks on Medical Machine Learning // Science. – 2019. – Vol. 363. – P. 1287–1289.

4. Geirhos R., Jacobsen J.-H., Michaelis C. et al. Shortcut Learning in Deep Neural Networks // Nature Machine Intelligence. – 2020, – Vol. 2. – P. 665–673.

5. Goodfellow I. J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and Harnessing Adversarial Examples // arXiv.org. – 2014. – URL: https://arxiv.org/abs/1412.6572 (дата обращения: 21.04.2026).

6. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Communications of the ACM. – 2017. – Vol. 60, No. 6. – P. 84–90,

7. Lake B. M., Ullman T. D., Tenenbaum J. B., Gershman S. J. Building Machines That Learn and Think Like People // Behavioral and Brain Sciences. – 2017. – Vol. 40,

8. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning // Nature. – 2015. – Vol. 521. – P. 436–444.

9. OpenAI. GPT-4 Technical Report // arXiv.org. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2303.08774 (дата обращения: 21.04.2026).

10. Radford A., Kim J. W., Hallacy C. et al. Learning Transferable Visual Models From Natural Language Supervision // arXiv.org. – 2021. – URL: https://arxiv.org/abs/2103.00020 (дата обращения: 21.04.2026).

11. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. «Why Should I Trust You?»: Explaining the Predictions of Any Classifier // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD. – 2016. – P. 1135–1144.

12. Yang I., Ye J., Dash A., Wang G. Illusions in Humans and AI: How Visual Perception Aligns and Diverges // arXiv.org. – 2024. – URL: https://arxiv.org/abs/2405.12345 (дата обращения: 21.04.2026).

13. Аверченков В. И., Ерохин А. А. Цифровая трансформация управления качеством в промышленности // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 4. – С. 45–52.

14. Кане М. М., Иванов Б. В., Корешков В. Н., Схиртладзе А. Г. Системы, методы и инструменты менеджмента качества. – М.: Питер, 2020, – 560 с.

15. Канеман Д. Думай медленно… решай быстро. – М.: АСТ, 2014. – 653 с.

16. Марр Д. Зрение: вычислительный подход к представлению и обработке визуальной информации. – М.: Мир, 1987. – 397 с.

17. Тверски А., Канеман Д. Принятие решений в условиях неопределенности: эвристики и ошибки // Вопросы психологии. – 1974. – № 4. – С. 21–35.

Ершов Д.С.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
ershov.metrolog@mail.ru
Горностаева А.К.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
alena.g02@mail.ru

РИСК УСТАРЕВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В ИТ-ОТРАСЛИ: СТРАТЕГИИ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ ЦИКЛОМ

Аннотация. В статье рассматривается проблема технологического устаревания как одного из ключевых стратегических рисков в ИТ-отрасли в условиях Индустрии 4.0, Показано, что традиционные реактивные подходы к управлению рисками становятся неэффективными при сокращении жизненного цикла технологий до 1–2 лет. На основе анализа концепций цифровизации, включая цифровую устойчивость предлагается системный методологический подход к проактивному управлению инновационным циклом.

Выделены и классифицированы основные факторы, влияющие на скорость технологического устаревания: гибкость архитектуры, темп появления новых технологий, уровень инвестиций в технологическое обновление и степень цифровизации компании. Разработана простая имитационная модель в виде эмпирической формулы, позволяющая количественно оценить вероятность критического устаревания. Проведена апробация модели на двух типовых профилях ИТ-компаний. Сформулированы две типовые стратегии управления инновационным циклом: постепенное обновление и платформенная устойчивость, а также предложены практические инструменты проактивного мониторинга.

Ключевые слова: Риск устаревания технологий, инновационный цикл, ИТ-отрасль, проактивное управление рисками, цифровизация, имитационное моделирование, цифровая устойчивость.

Ershov D.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
ershov.metrolog@mail.ru
Gornostaeva A.K.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
alena.g02@mail.ru

RISK MANAGEMENT IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION: CHALLENGES AND ADAPTATION STRATEGIES

Abstract. The article addresses the problem of technological obsolescence as one of the key strategic risks in the IT industry under the conditions of Industry 4.0, It is shown that traditional reactive approaches to risk management become ineffective as the technology life cycle shortens to 1–2 years. Based on an analysis of digitalization concepts, including digital resilience, a systematic methodological approach to proactive management of the innovation cycle is proposed. The main factors influencing the rate of technological obsolescence are identified and classified: architectural flexibility, the pace of emergence of new technologies, the level of investment in technology renewal, and the company's degree of digitalization. A simple simulation model in the form of an empirical formula is developed to quantify the probability of critical obsolescence. The model is tested on two typical profiles of IT companies. Two typical strategies for managing the innovation cycle are formulated – gradual renewal and platform sustainability – and practical tools for proactive monitoring are proposed.

Keywords: Technological obsolescence risk, innovation cycle, IT industry, proactive risk management, digitalization, simulation modeling, digital resilience.

В условиях Индустрии 4.0 технологии меняются так быстро, что жизненный цикл ИТ-решений сократился до 2 лет вместо прежних 5 – 7 лет [1]. Для ИТ-отрасли ситуация, когда технологии устаревают, стала фактором, который определяет долгосрочное развитие и влияет на способность компаний конкурировать на рынке. По данным отчетов более 60% ИТ-компаний

работают в условиях «технологического долга» [2]. И когда новые платформы, такие как квантовые вычисления, edge computing и AI-as-a-Service, появляются быстрее, традиционные реактивные подходы управления рисками перестают приносить результат [3].

Методология данного исследования является комплексной. Оно опирается на системный анализ и имитационное моделирование через системную динамику [4]. Также проводится сравнительный анализ разных концепций цифровизации.

Теоретические основы управления риском технологического устаревания

Природа риска устаревания в ИТ-отрасли

В теории управления рисками под устареванием технологий понимается ситуация, когда организация может потерять свои преимущества перед конкурентами [5, 6]. Это происходит, когда решения в сфере технологий не соответствуют актуальному уровню развития цифровых платформ или требованиям рынка [7].

По сравнению с традиционными отраслями, в ИТ-отрасли процессы устаревания технологий происходят неравномерно и имеют свойство накапливаться. Цифровизация не только делает процессы автоматическими, но и полностью меняет природу конкуренции [8]. Если внедрение новой технологической платформы задерживается на срок от 6 до 12 месяцев, компания может безвозвратно потерять свою часть рынка.

При анализе текущих способов внедрения цифровых технологий становится понятно, что использование только технических средств без изменений в процессах и культуре увеличивает риск того, что система устареет [7]. Для компаний, которые стремятся только к тому, чтобы сделать все процессы автоматическими, характерен «архитектурный долг». Из-за этого переход на новые платформы требует очень больших финансовых и временных ресурсов [9].

Классификация рисков, связанных с устареванием

При цифровизация возникают три основные категории рисков устаревания применительно к ИТ-отрасли [2, 10].

Во-первых, это рыночные риски, связанные с появлением disruptive-технологии, таких как переход от монолитных систем к микросервисам [1]. В этих условиях ценность денег, которые были вложены ранее, становится низкой [8]. Во-вторых, ресурсные риски, выражающиеся в дефиците специалистов по новым технологиям [3]. Из-за этого имеющиеся кадры перестают соответствовать современным требованиям. В-третьих, архитектурные риски, связанные с накоплением технического долга из-за длительного использования legacy-систем, которые постепенно становятся узким местом для внедрения инноваций [9].

В таблице 1 представлена классификация влияния ключевых технологий цифровизации на риск устаревания с указанием срока актуальности каждого решения.

Таблица 1

Влияние технологий цифровизации на риск устаревания

Технология	Влияние на риск устаревания	Срок актуальности
Облачные (serverless)	Высокое – снижает риск, но создает зависимость	3–4 года
Искусственный интеллект	Очень высокое – ускоряет разработку, но требует новых компетенций	1–2 года
Микросервисная архитектура	Высокое – снижает кумулятивный риск	5–7 лет
Блокчейн	Среднее – узкая ниша, платформы быстро устаревают	2–3 года

Факторы и имитационная модель риска устаревания

Ключевые факторы влияния

На основе анализа отраслевой специфики выделены следующие группы факторов, определяющих скорость и глубину технологического устаревания [5].

Технологические факторы включают скорость выхода новых версий, степень совместимости с существующими legacy-системами, а также открытость экосистемы. Организационные факторы охватывают процессы, проводимые в целях эксперимента в компании, наличие выделенного бюджета на технологическое изучение рынка и квалификацию специалистов, способных создавать расширяемые системы [2, 7]. Экономические факторы связаны со стоимостью перехода с устаревших платформ и доступностью финансирования для технологического обновления [4, 8]. Наконец, рыночные факторы проявляются в давлении со стороны конкурентов, уже внедривших инновации, и в изменении запросов клиентов на новые интерфейсы и протоколы взаимодействия [3, 11].

Имитационная модель оценки риска

Для количественной оценки влияния перечисленных факторов была разработана имитационная модель на основе системной динамики. Основное уравнение риска устаревания:

$$PObs = (1 - A) \times (T / R) \times D, \quad (1)$$

где $PObs$ – вероятность устаревания,

A – гибкость архитектуры (индекс 0–1),

T – темп появления новых технологий (количество значимых релизов в год),

R – доля бюджета на технологическое исследование и обновление (%),

D – уровень цифровизации (доля процессов на современных технологиях,%).

Уровень цифровизации (D) представляет собой долю бизнес-процессов и ИТ-компонентов, реализованных на современных технологических платформах. Темп появления новых технологий (T) отражает количество значимых релизов или платформенных сдвигов в отрасли за год. Доля бюджета на технологическую разведку и обновление (R) показывает, какой процент от выручки компания инвестирует в мониторинг трендов и экспериментальные проекты. Гибкость архитектуры (A) – индекс, характеризующий степень связанности и заменяемости компонентов системы.

Смысл уравнения в том, что риск тем выше, чем ниже гибкость архитектуры, чем выше внешний темп инноваций по сравнению с внутренними инвестициями, и чем выше уровень цифровизации [12].

Апробация модели для ИТ-отрасли

Проведено моделирование для двух типичных профилей ИТ-компаний с горизонтом прогнозирования 3 года. Профиль А представляет собой традиционного ИТ-аутсорсера с уровнем цифровизации 60%, темпом появления новых технологий 8, долей инвестиций 5% от выручки и гибкостью архитектуры 0,4. Профиль Б – инновационная продуктовая компания с уровнем цифровизации 85%, темпом технологий также 8, но с инвестициями 15% и гибкостью архитектуры 0,8. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2

Динамика риска устаревания (прогноз на 3 года)

Показатель	Профиль А (год 0)	Профиль А (год 3)	Профиль Б (год 0)	Профиль Б (год 3)
Накопленный технологический долг (усл. ед.)	50	78 (+56%)	30	35 (+17%)
Вероятность критического устаревания (PObs)	0,12	0,31	0,06	0,09
Скорость вывода новых продуктов (мес.)	8	11	4	4,5

Результаты показывают, что в традиционных организациях технологический долг увеличивается в 2,5 раза интенсивнее. За три года вероятность того, что технологии станут непригодными для использования, возрастает с 12% до 31%. Но инновационные компании сохраняют этот показатель на уровне менее 10%, так как они используют гибкую архитектуру и направляют ресурсы в развитие.

При проведении анализа чувствительности стало ясно, что гибкость архитектуры является основным фактором. Если ее значение, то показатель

вероятности критического устаревания уменьшается. На втором месте по значимости находится объем ресурсов, которые направляются на технологическое исследование [8, 11].

Стратегии проактивного управления инновационным циклом

Стандартные подходы к обновлению

На основе результатов имитационного моделирования выделены две базовые стратегии управления инновационным циклом, различающиеся по целям, ресурсам и архитектурным подходам.

Стратегия «постепенного обновления» рекомендуется для масштабных организаций, которые имеют старые информационные системы [9]. Суть стратегии заключается в ежегодном переносе 15–20% компонентов на современные платформы с одновременным созданием промежуточного слоя между старыми и новыми программами, что позволяет снизить риски несовместимости. Целевым показателем является повышение индекса гибкости архитектуры.

Стратегия «платформенной устойчивости» ориентирована на компании, которые развивают цифровые экосистемы [3]. Ключевая стратегия – создание внутренней платформы, которая функционирует как продукт, при этом интерфейсы приводятся к единому стандарту, что позволяет централизованно управлять обновлениями без воздействия на потребительские сервисы.

Инструменты проактивного мониторинга

Практическая реализация предложенных стратегий требует внедрения специализированных инструментов, которые сами являются продуктами цифровизации процессов управления рисками [1, 2]. Первым таким инструментом выступает «цифровой двойник архитектуры» – виртуальная модель, отражающая все зависимости между компонентами, версии библиотек и прогнозирующая конфликты при обновлениях. Внедрение цифрового двойника позволяет снизить риск несовместимости при переходах на 30–40%. Второй инструмент –дашборд, агрегирующий данные из открытых и распределяющий технологии по степени угрозы устаревания.

Проведенное исследование позволяет сделать несколько обобщающих выводов. Во-первых, риск устаревания технологий в ИТ-отрасли носит стратегический характер и требует перехода от реактивного к проактивному управлению. Традиционные подходы неэффективны в условиях, когда жизненный цикл технологий сократился до 1–2 лет. Во-вторых, предложена и апробирована имитационная модель на основе системной динамики, позволяющая количественно оценить влияние ключевых факторов на вероятность критического устаревания. В-третьих, разработаны две типовые стратегии управления инновационным циклом – постепенное обновление и платформенная устойчивость, – каждая из которых содержит конкретные целевые показатели по переносу компонентов, уровню инвестиций и динамике гибкости. Практическая значимость работы заключается в комплексе инструментов проактивного мониторинга: цифровой двойник архитектуры и дашборд.

Список литературы

1. Балдин, К.В. Риск-менеджмент: учеб. пособие / К.В. Балдин. – М.: Эксмо, 2024. – 364 с.
2. Фирсова, О.А. Управление рисками организаций / О.А. Фирсова. – М.: Академия безопасности, 2023. – 226 с.
3. Хопкин, П. Основы управления рисками / П. Хопкин. – Лондон: Kogan Page, 2024. – 448 с.
4. Уродовских, В.Н. Управление рисками предприятия: учебное пособие / В.Н. Уродовских. – М.: Вузовский учебник, ИНФРА-М, 2023. – 168 с.
5. Вишняков, Я.Д. Общая теория рисков: учеб. пособие / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. – М.: Академия, 2023. – 368 с.
6. Мамаева, Л.Н. Управление рисками: учебное пособие / Л.Н. Мамаева. – М.: Дашков и К, 2024. – 256 с.
7. Фомичёв, А.Н. Риск-менеджмент / А.Н. Фомичёв. – М.: Дашков и К, 2023. – 376 с.
8. Ильин, В.В. Системный подход к оценке финансовых рисков / В.В. Ильин // Финансы. – 2024. – № 1. – С. 68–72
9. Воробьев, С.Н. Системный анализ и управление рисками в предпринимательстве / С.Н. Воробьев. – М.: МПСУ, 2023. – 121 с
10. Кудрявцев, А.А. Интегрированный риск-менеджмент / А.А. Кудрявцев. – М.: Экономика, 2024. – 656 с.
11. Титович, А.А. Менеджмент риска и страхования: учебное пособие / А.А. Титович. – 2-е изд. – Мн.: Вышэйшая школа, 2023. – 287 с.
12. Ступаков, В.С. Риск-менеджмент: учеб. пособие / В.С. Ступаков, Г.С. Токаренко. – М.: Финансы и статистика, 2024. – 282 с.

Каримов А.А.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
artur.karimov.xavier@gmail.com
Рахманов Н.И.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
www.nazim98@mail.ru

РОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ В ПОВЫШЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЭПОХУ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Аннотация. В настоящее время цифровизация в России находится на этапе активного развития и рассматривается как одно из ключевых направлений модернизации экономики и промышленности. Государство реализует программы цифровой трансформации, направленные на внедрение искусственного интеллекта. Особое внимание уделяется промышленному сектору, где цифровые технологии используются для повышения производительности, автоматизации производственных процессов и снижения издержек. В статье исследуется роль технологических инноваций – искусственного интеллекта (ИИ),

технологий анализа больших данных (Big Data) и Интернета вещей (IoT) – в повышении конкурентоспособности предприятий промышленности России в условиях цифровой трансформации экономики. Актуальность исследования обусловлена устойчивым ростом обрабатывающих производств, необходимостью импортозамещения и адаптацией промышленного сектора к внешним экономическим и технологическим вызовам. На основе данных Росстата и статистических сборников НИУ ВШЭ «Индикаторы цифровой экономики: 2025» и «Индикаторы инновационной деятельности: 2025» проанализированы основные направления внедрения ИИ, Big Data и IoT в промышленности, а также их влияние на производительность труда, снижение издержек, качество продукции и оперативность управленческих решений. Установлено, что использование указанных технологий способствует сокращению операционных затрат на 10–30%, снижению уровня производственного брака, повышению эффективности бизнес-процессов и устойчивости предприятий к рыночным изменениям. Выявлены ключевые барьеры внедрения, включая дефицит квалифицированных кадров, высокие первоначальные инвестиции, недостаточный уровень цифровой инфраструктуры и риски кибербезопасности. Сформулированы практические рекомендации по стратегическому управлению технологическими инновациями с учётом отраслевой специфики. Результаты исследования могут быть использованы при разработке программ цифровизации промышленности и повышении конкурентоспособности предприятий.

Ключевые слова: технологические инновации; искусственный интеллект; Big Data; Интернет вещей (IoT); конкурентоспособность; промышленные предприятия; цифровая трансформация; обрабатывающие производства; Россия.

Karimov A.A.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
artur.karimov.xavier@gmail.com
Rakhmanov N.I.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
www.nazim98@mail.ru

THE ROLE OF TECHNOLOGICAL INNOVATION IN ENHANCING THE COMPETITIVENESS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES IN THE ERA OF DIGITAL TRANSFORMATION

Abstract. Digitalization in Russia is currently at a stage of active development, and technological innovation is becoming a key factor of competitiveness for industrial enterprises. The article examines the role of technological innovation – artificial intelligence, Big Data and the Internet of Things – in improving the efficiency and competitiveness of manufacturing enterprises during digital transformation. Statistical data on the digitalization of manufacturing in Russia are analysed and the dynamics of manufacturing's contribution to GDP are considered. Recommendations for accelerating the adoption of digital technologies in industry are proposed.

Keywords: technological innovation; artificial intelligence; Big Data; digital transformation; competitiveness; manufacturing industry.

В эпоху цифровой трансформации технологические инновации становятся ключевым фактором обеспечения конкурентоспособности промышленных предприятий. По данным Росстата, обрабатывающие производства продолжают демонстрировать положительную динамику: в 2024–2025 годах их вклад в рост ВВП остаётся значительным, с ростом индекса производства в отдельных сегментах (компьютеры, электроника, транспортные средства) [1, 4].

Внедрение искусственного интеллекта, технологий Big Data и Интернета вещей (IoT) позволяет радикально трансформировать производственные процессы: от предиктивного обслуживания оборудования до оптимизации цепочек поставок и управления качеством в реальном времени [2, 5]. Эти технологии способствуют снижению издержек, повышению производительности и созданию новых конкурентных преимуществ в условиях глобальной конкуренции и импортозамещения.

Теоретическую основу составляют концепции цифровой трансформации промышленности (Industry 4.0/5.0), теории конкурентных преимуществ М. Портера и модели динамических способностей [4, 5]. ИИ обеспечивает интеллектуальную аналитику и принятие решений, Big Data – обработку больших объёмов информации для прогнозирования, а IoT – подключение физических объектов к цифровым системам для мониторинга в реальном времени. Совместное применение этих технологий формирует «умное производство», повышая эффективность и адаптивность предприятий [6, 12].

Согласно сборнику «Индикаторы цифровой экономики: 2025» (НИУ ВШЭ), рынок Big Data и ИИ в России демонстрирует высокие темпы роста (25–35% ежегодно), объём рынка в 2024 году превысил 430 млрд руб. [7, 8]. В промышленности активно внедряются решения для предиктивного обслуживания и оптимизации процессов.

Уровень использования цифровых технологий в организациях обрабатывающих производств растёт, однако остаётся ниже среднего по экономике в сегментах малого бизнеса и будет показан ниже в таблицах 1 и 2. Предприятия с высоким уровнем цифровизации фиксируют сокращение простоев оборудования и снижение брака на 20–40% [9].

Таблица 1

Динамика вклада обрабатывающих производств в ВВП России

Год	Вклад в ВВП,%
2024	+3,9 (значительный рост в ключевых сегментах)
2025	Положительная динамика

Источник: Росстат.

Таблица 2

Темпы роста рынка ключевых технологий

Технология	Темпы роста
Биг дата и ИИ	25–35% ежегодно
Интернет вещей	Значительный рост (рынок IoT=181 млрд.руб в 2024 г.

Источник: НИУ ВШЭ.

Влияние технологических инноваций (ИИ, Big Data, IoT) на конкурентоспособность предприятий промышленности

Технологические инновации существенно повышают конкурентоспособность промышленных предприятий за счёт оптимизации процессов, снижения издержек и повышения качества продукции. Искусственный интеллект обеспечивает предиктивную аналитику и автоматизацию принятия решений, Big Data – обработку больших массивов данных для прогнозирования спроса и оптимизации цепочек поставок, а IoT – мониторинг оборудования в реальном времени (предиктивное обслуживание) [2, 10].

Эмпирические данные подтверждают положительный эффект и будут показаны в Таблице 3. В 2024 году расходы российских компаний на внедрение ИИ составили 90,3 млрд руб., из них на обрабатывающую промышленность пришлось 4,6% (4,1 млрд руб.) [11]. Предприятия с высоким уровнем внедрения этих технологий фиксируют сокращение простоев оборудования на 20–40%, снижение брака и рост производительности труда на 10–30% [12].

Таблица 3

Эффекты внедрения ИИ, Больших данных и Интернета Вещей (2024–2025)

Показатель	Эффекты от внедрения
Сокращение операционных затрат	10–30%
Снижение простоев оборудования	20–40%
Рост производительности труда	10–30%
Снижение брака	До 50% (в отдельных кейсах)

Источник: НИУ ВШЭ, FinExpertiza

Барьеры и драйверы внедрения технологических инноваций

Драйверы:

• Государственная поддержка (национальные проекты, субсидии на цифровизацию, импортозамещение ПО).

• Рост рынка Big Data и ИИ (433 млрд руб. в 2024, прогноз до 520 млрд руб. в 2025) [7, 8].

• Необходимость повышения эффективности в условиях санкций и дефицита кадров.

• Развитие российского ПО и облачных решений.

Основные барьеры:

• Высокие первоначальные инвестиции и длительный срок окупаемости.

• Дефицит квалифицированных ИТ-кадров и специалистов по данным.

• Риски кибербезопасности и сложности интеграции с существующими системами.

• Неоднородность по регионам и размерам предприятий (выше в крупных компаниях) [2, 13].

Практические рекомендации

Для повышения конкурентоспособности предприятиям промышленности рекомендуется:

1. Разрабатывать поэтапные стратегии внедрения ИИ, Big Data и IoT, начиная с пилотных проектов по предиктивному обслуживанию.

2. Активно использовать меры государственной поддержки и партнёрства с ИТ-компаниями.

3. Инвестировать в обучение персонала цифровым компетенциям.

4. Уделять особое внимание кибербезопасности и интеграции технологий.

5. Учитывать отраслевую специфику: в машиностроении – IoT для мониторинга, в химической промышленности – Big Data для оптимизации процессов.

Проведённое исследование показало, что технологические инновации (ИИ, Big Data, IoT) играют ключевую роль в повышении конкурентоспособности предприятий промышленности в эпоху цифровой трансформации. Они обеспечивают значительное снижение издержек, рост производительности и качества продукции.

Несмотря на существующие барьеры, положительная динамика рынка и государственная поддержка создают благоприятные условия для ускоренного внедрения. Реализация предложенных рекомендаций позволит промышленным предприятиям России укрепить позиции на внутреннем и внешнем рынках. Перспективы дальнейших исследований связаны с количественной оценкой эффектов в разрезе подотраслей и регионов.

Список литературы

1. Росстат. Первая оценка ВВП за 2025 год [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru

2. Индикаторы цифровой экономики: 2025 : статистический сборник / В. Л. Абашкин, Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишневский, Л. М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : ИСИЭЗ ВШЭ, 2025. – 296 с. https://publications.hse.ru/view/993151249

3. Индикаторы инновационной деятельности: 2025 : статистический сборник / В. В. Власова, Л. М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : ИСИЭЗ ВШЭ, 2025. – 196 с. https://issek.hse.ru/news/1015093288.html

4. Абдрахманова Г.И. и др. Цифровая трансформация: ожидания и реальность : доклад. – М. : НИУ ВШЭ, 2024 https://publications.hse.ru/view/617690103

5. Котенев Д.А. Влияние цифровой трансформации на конкурентоспособность российского бизнеса // Прогресс в гуманитарных и социальных науках. – 2025. https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tsifrovoy-transformatsii-na-effektivnost-biznes-protsessov-i-konkurentosposobnost-predpriyatiy
6. Росстат. Индекс промышленного производства, 2025 [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru
7. Данные по внедрению ИИ и IoT в промышленности // Коммерсантъ, 2025. https://www.kommersant.ru/doc/8179963
8. FinExpertiza. Расходы российских компаний на ИИ в 2024 году [Электронный ресурс]. – 2025. https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2025/trat-na-ii/
9. Примеры внедрения ИИ в промышленности // KT.Team, 2025 https://www.kt-team.ru/blog/ai-implementation-examples-industries.
10. TAdviser. Рынок больших данных и ИИ в России, 2025. https://www.tadviser.ru/index.php
11. Росстат. Данные по обрабатывающим производствам, 2025. https://rosstat.gov.ru/folder/313/document/280193
12. Коммерсантъ. Рынок Big Data и ИИ в России, 2025. https://www.kommersant.ru/doc/8195596
13. Smart Ranking. Рынок ИИ в России, 2025. http://smartranking.ru/ru/analytics/ai/rynok-iskusstvennogo-intellekta-v-rossii-vyros-za-god-na-25/

Панов А.Н.
к.т.н., главный эксперт
ЮРС-РУСЬ
Россия, Санкт-Петербург
a.panov@tut.by
Ромашова Е.Ю.
младший научный сотрудник
ИМАШ РАН
Россия, Москва
romashova@imash.ru
Ерофеев М.Н.
д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
ИМАШ РАН
Россия, Москва
erofeeff2007@yandex.ru

СТРАТЕГИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ПРОРЫВА. РИСКОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПРОЕКТНО-ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД В ЦЕПИ ПОСТАВОК. ЦЕЛИ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ, ПОКАЗАТЕЛИ ПРИГОДНОСТИ ПРОЦЕССОВ МЕНЕДЖМЕНТА: РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ЗАЩИЩЕННОСТЬ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы устаревания процессного подхода систем менеджмента качества и в международных и государственных стандартах прочих систем менеджмента организаций. Разработаны методология и модели рискориентированного проектно-процессного подхода в организации и в цепи поставок. Предложены

взаимосвязанные модели для установления для процессов системы менеджмента качества (СМК целей) в области качества, надежности и безопасности, а также показателей пригодности процессов менеджмента: результативность, эффективность, защищенность. Для применения разработок дано соответствующее описание предложенного рискориентированного проектно-процессного подхода. Результаты, разработанных методологии и моделей применены при разработке государственных стандартов на системы менеджмента качества для машиностроения и связанных отраслей экономики.

Ключевые слова: качество, проектно-процессный подход, стандартизация, риски, цели, пригодность, результативность, эффективность, защищенность.

Panov A.N.
Candidate of Technical Sciences, Chief Expert
URS-RUSS
Russia, Saint-Petersburg
a.panov@tut.by
Romashova E.Yu.
Junior Researcher
IMASH RAS
Russia, Moscow
romashova@imash.ru
Erofeev M.N.
Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for research
IMASH RAS
Russia, Moscow
erofeeff2007@yandex.ru

GLOBAL BREAKTHROUGH STRATEGY.RISK-ORIENTED PROJECT-PROCESS APPROACH IN THE SUPPLY CHAIN. QUALITY, RELIABILITY AND SAFETY GOALS, MANAGEMENT PROCESS FITNESS INDICATORS: PERFORMANCE, EFFICIENCY, PROTECTION

Abstract. The article discusses the problems of obsolescence of the process approach of quality management systems in international and state standards of other management systems of organizations. A methodology and models of a risk-based design and process approach in the organization and in the supply, chain have been developed. Interrelated models are proposed to establish quality, reliability, and safety goals for quality management system (QMS processes), as well as indicators of the suitability of management processes: effectiveness, efficiency, and security. An appropriate description of the proposed risk-based design and process approach is given for the application of the developments. The results of the developed methodology and models have been applied in the development of state standards for quality management systems for mechanical engineering and related industries.

Keywords: quality, design and process approach, standardization, risks, goals, suitability, effectiveness, efficiency, security.

Проведенный анализ используемой методологии и моделей систем менеджмента качества организаций, основанных на стандарте ISO 9001 и проекте 2026 г. ISO 9001 (FDIS) позволяет (рис. 1) сделать выводы, что они методологически устарели и не адекватны, в том числе ISO 9001 (FDIS), по

меньшей мере из-за фактически отсутствия рискориентированного подхода; не учета «возможностей»; не использования методики проектного менеджмента; устаревания определений ключевых методологических терминов (качество и т.д.).

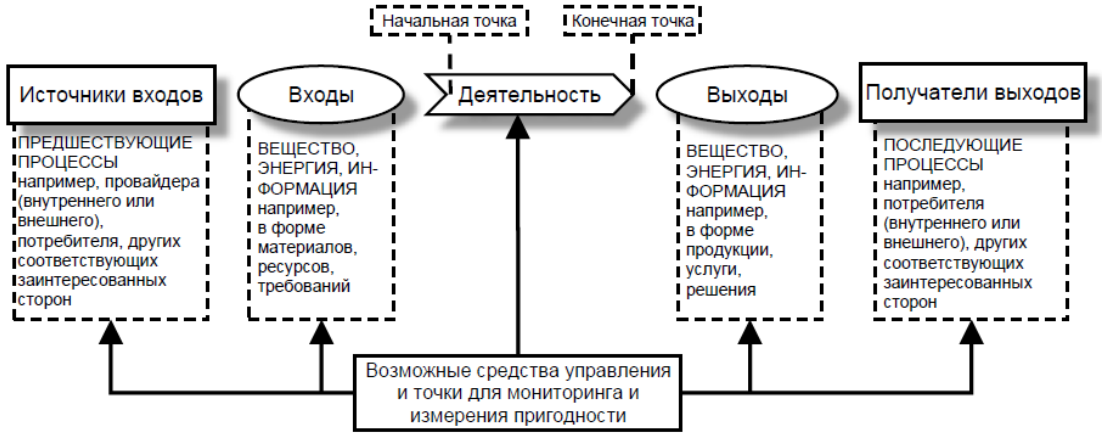


Рис. 1. Схематичное представление элементов отдельного процесса (ISO 9001)

Указанная неадекватность поставленным задачам по технологическому суверенитету, основанному на методологии стандартизации, на практике привела к системному кризису, что потребовало создание новых прорывных решений в методологии качества [1–8].

Модели систем менеджмента, в том числе качества, практика их применения приводит к системным ошибкам при формулировании целей процессов, в том числе в области качества, а также взаимосвязанных с целями показателей пригодности процессов менеджмента. Указанное не позволяет адекватно достигать целей по критериям «результативности», «эффективности». На практике используемые показатели, например, KPIs, не совершены. По меньшей мере не сформулировано их применение во взаимосвязи с показателями, установленными ISO 9000,

Следует отметить, что без установления в государственных стандартах и на практике предложенного показателя пригодности процесса – «защищенность», не адекватно и мало продуктивно выполнение в организациях анализа рисков процессов СМК и т.п. (например, разработка реестров рисков) [1–8].

Необходимо отметить, что не совершенна практика декомпозиции/ разворачивания целей в области качества процессов и взаимосвязанных показателей пригодности процессов по критериям результативности, эффективности и защищенности. В результате в широкой практике в организациях отсутствуют связи между целями для достижения соответствия качеству в иерархии «элемент – подсистема – система – конфигуратор» и показателями пригодности процесса. Это приводит к не результативности совершенствования процессов менеджмента качества и как следствие – производство неконкурентоспособной продукции по критерию «качество-цена».

Для разработки моделей и методологии рискориентированного проектно-процессного подхода использованы, либо развитые следующие термины с соответствующими определениями:

аттрактор (attractor) <система менеджмента>: равновесное состояние или устойчивое поведение системы менеджмента в существующем контексте, позволяющее достигать целей при приемлемых рисках и снижении требуемых ресурсов на основе использования созданных фракталов социотехнических систем при росте энтропии.

бифуркация (bifurcation) <система менеджмента>: изменение в малый период состояния сложной социотехнической системы с существенно нелинейными свойствами, находящейся в условиях вероятно-совместного влияния характеристик процессов на ее цели, которое существенно, нелинейно, скачкообразно, многовариантно изменяет ее выходы.

возможность (capability) <процесс>: способность объекта создавать выход, который будет отвечать требованиям к этому выходу (ISO 9000).

защищенность (protectability) <показатель пригодности системы>: состояние системы, предотвращающее при достижении целей наступление чрезмерного риска путем снижения уязвимостей и ущербов при заданных/прогнозируемых сценариях угроз.

качество (quality): степень соответствия набора присущих характеристик объекта требованиям **при достижении приемлемых рисков.**

культура организации (organization culture): исторически определенный уровень развития организации, ее творческих сил и способностей, выраженный в типах и формах ее процессов жизни и деятельности, а также создаваемых ею материальных и духовных ценностях.

надежность (dependability) <технический объект>: свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования **при достижении приемлемых рисков**.

результативность (effectiveness): степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов (ISO 9000).

результативность (effectiveness) <рискориентированный подход>: степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов при приемлемых рисках для конфигуратора.

риск (risk): воздействие неопределенности (ISO 9000).

рискориентированный проектно-процессный подход (risk-oriented project-process approach): методология менеджмента и системной взаимосвязи процессов и проектов организации на основе менеджмента рисков.

стандарт (standard): оптимальным образом упорядоченная, повторяющаяся деятельность при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами. В действующем законодательстве может использоваться иное определение термина. Данное определение применяется в рамках рискориентированного мышления.

угроза (threat): потенциальный источник опасности, вреда или другого нежелательного результата (ISO 31073).

ущерб (damage): потенциальная или фактическая потеря.

Классификация ущерба:

По значимости: пренебрежимый, приемлемый и чрезмерный.

По воздействию: прямой, косвенный и отдаленный.

Ущерб в конечном итоге при анализе рисков имеет финансовый эквивалент.

уязвимость (vulnerability): непригодность системы противостоять угрозам при достижении цели.

фрактал (fractal) <система менеджмента>: упорядоченная, устойчивая информационная структура/код, задающая возможности и ограничения для взаимодействия/развития открытых самоорганизующихся сложных социотехнических систем путем синтеза подобных себе структур на различных уровнях их иерархии, позволяющая оптимально обеспечивать требуемую результативность/эффективность и защищенность.

цель (objective): результат, который будет достигаться (ISO 9000).

эффективность (efficiency): связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами (ISO 9000).

Предложена классификация рисков как функции времени – «события», «вариации», «бифуркации» (рис. 2). Указанное позволяет адекватно управлять причинами возникновения несоответствий, уязвимостью систем, а также достигать приемлемости рисков. Предложено отказаться от действующего устаревшего процессного подхода (рис.1) и использовать культуру рискориентированного проектно-процессного подхода в цепи поставок (рис.3) и, таким образом, реализовать стратегию глобального прорыва технологического лидерства в области методологии управления качеством в предложенной парадигме «качество – цена – риски».



Рис. 2. Классификация видов рисков как функции от времени

В модели рискориентированного проектно-процессного подхода (рис. 3) структурированы и определены цели, в том числе, в области качества, риски (события, вариации и бифуркации) их предупреждение и парирование, а также использование возможностей [1–8]. В модели сформулированы «входы-выходы» к каждому этапу жизненного цикла проекта организации, соответствующие ресурсы и показатели пригодности этапов проекта (результативность, эффективность и защищенность).

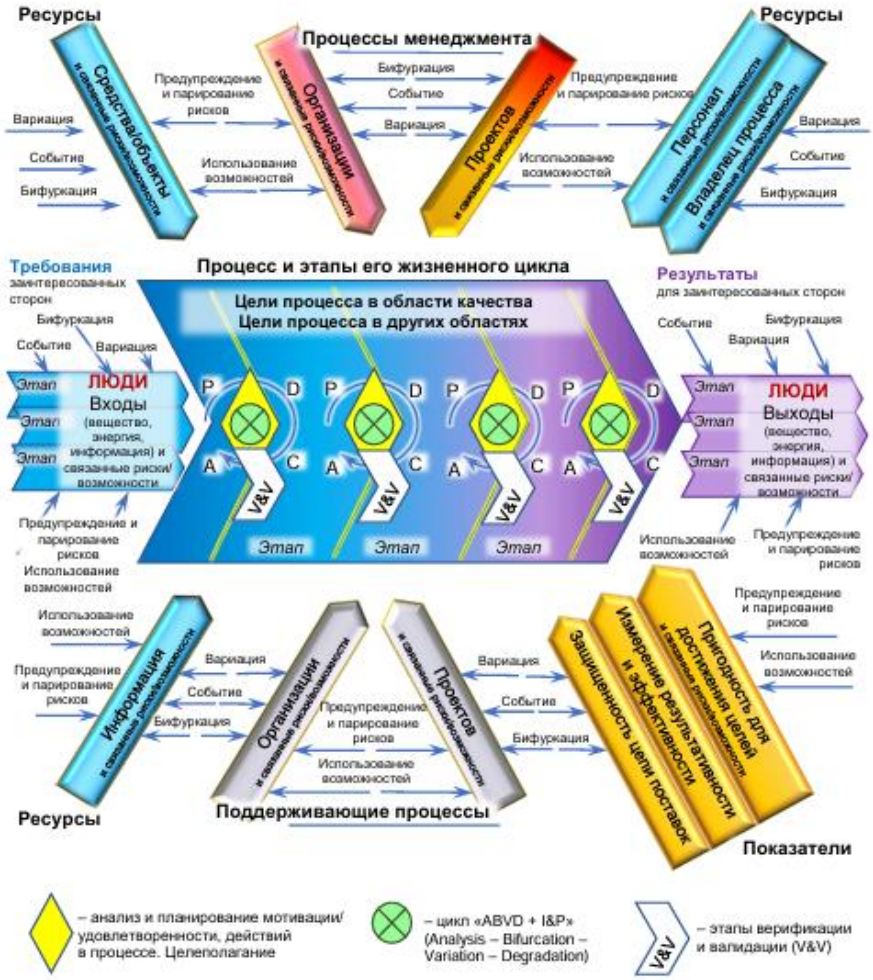


Рис. 3. Схематичное представление структуры процесса организации на основе рискориентированного проектно-процессного подхода – диаграмма «Кросби – Шкадрецов – Панов»

Предложено применять рискориентированный подход при определении целей, показателей пригодности процесса в цепи поставок (рис. 4). Для этого определяются поля допусков (для штатных и нештатных ситуаций), требования к вероятности попадания в них, с учетом значимости последствий и интегрального ущерба. Учитываются штатные и чрезвычайные сценарии развития событий в жизненном цикле организации, проектов и продукции. Статистические данные, полученные при мониторинге процессов, позволяют проводить как расчеты статистической вариации, так и достиже-

ния установленных вероятностных показателей пригодности по результативности, эффективности и защищенности. Указанное определяет требуемые действия для управления рисками, снижения уязвимости систем, процессов и для обеспечения пригодности процессов для каждого рассматриваемого сценария.

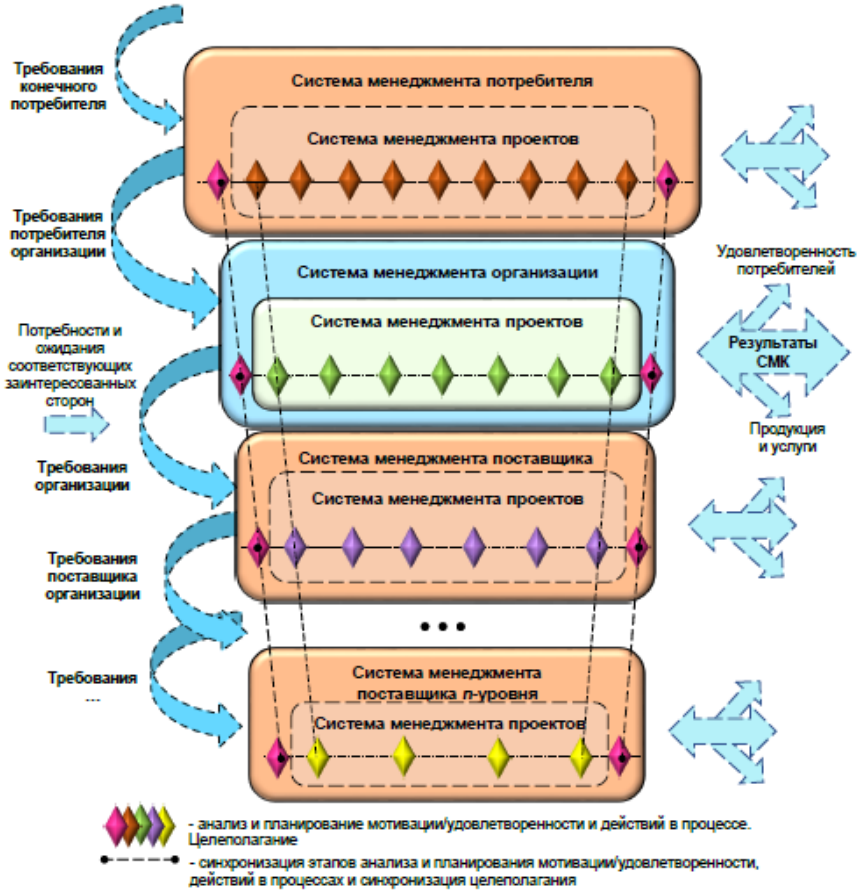


Рис. 4. Структурная схема в цепи поставок рискориентированного проектно-процессного подхода

Сформулированные рискориентированный проектно-процессный подход в цепи поставок, требования к целям в области качества, к показателям пригодности процессов менеджмента (результативность, эффективность, защищенность) положены в методологическую основу при разработке серии государственных стандартов для систем менеджмента качества организаций машиностроения и связанных отраслей.

В заключении следует отметить следующее

1. Действующая методология и модели систем менеджмента качества организации, основанные на стандарте ISO 9001 и проекте ISO 9001 (FDIS) методологически устарели и не адекватны по меньшей мере из-за: отсутствия рискориентированного подхода; не учета «возможностей»; не применения проектного подхода. Указанное приводит к системному кризису для обеспечения конкурентоспособности и требуются срочные новые прорывные решения в методологии качества.

2. Применяемые модели и практика их применения приводит к системным ошибкам при формулировании целей процессов системы менеджмента, целей в области качества, показателей пригодности процессов по критериям «результативности», «эффективности» достигать указанные целей. Используемые на практике в отдельных случаях показатели KPIs – по меньшей мере не сформулированы во взаимосвязи с показателями ISO 9000,

3. Применяемые в стандартах ISO серии 9000 требования по установлению приемлемости рисков (разработка реестров рисков и т.п.) процессов не адекватны без формулирования показателей пригодности процесса – «защищенность».

4. Не совершенна практика декомпозиции/ разворачивания целей и показателей пригодности процессов по критериям результативности, эффективности и защищенности. Указанное приводит к отсутствию связей между характеристиками для достижения соответствия качества, надежности и безопасности в иерархии «элемент-подсистема-система-конфигуратор».

5. Предложено использовать классификацию рисков как функцию времени «события», вариации», «бифуркации». Указанное позволяет адекватно управлять анализом причинами возникновения и уязвимостью систем, а также достигать приемлемости рисков.

6. Предложено реализовать стратегию глобального прорыва – отказаться от действующего устаревшего процессного подхода и использовать культуру рискориентированного проектно-процессного подхода в цепи поставок.

7. В предлагаемой стратегической модели рискориентированного проектно-процессного подхода структурированы и определены цели, в том числе, в области качества, риски (события, вариации и бифуркации) их предупреждение и парирование, а также использование возможностей, сформулированы «входы-выходы» к каждому этапу жизненного цикла проекта и организации, соответствующие ресурсы и показатели пригодности этапов проекта (результативность, эффективность и защищенность) достигать цели на каждом из идентифицированных этапов.

8. Следует особо отметить, что предложено применять рискориентированный подход как для показателей целей, так и показателей пригодности процесса достигать идентифицированных целей. Устанавливаются поля допусков для целей, требования к вероятности достижения целей (попадания в допуск), с учетом значимости последствий и интегрального ущерба. Учитываются штатные и чрезвычайные сценарии. Соответственно, статистические данные процесса, полученные при мониторинге, позволяют проводить расчеты вариации и достижения установленных вероятностных показателей пригодности по результативности, эффективности и защищенности. Последнее и определяет требуемые действия для управления рисками и обеспечения пригодности процессов для каждого рассматриваемого сценария.

9. Разработанные рискориентированный проектно-процессный подход в цепи поставок, требования к целям в области качества, надежности и безопасности, показатели пригодности процессов менеджмента: результативность, эффективность, защищенность использованы при разработке серии государственных стандартов для систем менеджмента качества машиностроения и связанных отраслей.

Научный доклад выполнен в рамках выполнения научной темы FFGU-2024-0024.

Список литературы

1. Махутов Н.А. Научны основы анализа стратегических приоритетов и рисков развития России: информационно-аналитическая справка по проблемам стратегического прогнозирования, планирования и программирования в целях устойчивого социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности. – М.: МГОФ «Знание», 2018 г. – 96 с., ил.

2. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность/ Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.

3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности/ Под общ. ред. Н. А. Махутова. Москва: Знание, 2015. 936 с.: ил.

4. Панов А.Н. и др. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / Под общ. ред. А.Н. Панова. Минск: БГАТУ, 2009. 482 с.

5. Горбацевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография / Под общ. ред. А.Н. Панова. Минск: Технопринт, 2005. 264 с.: ил.

6. Логвин В.А. и др. Технологическое обеспечение машиностроительного производства: Учебное пособие/ Под ред. Ж. А. Мрочека. Минск: РИВШ, 2021. 560 с.: ил.

7. Арбузов В.И. и др. Основы системы менеджмента качества машиностроительного предприятия. Минск: Технопринт, 2000, 280 с.

8. Панов, А.Н. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков / А.Н. Панов, Ж.А. Мрочек, В.М. Пашкевич// Вестн. Белорус. Рос. ун-та. – 2022.- №4. С. 35–47.

9. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Рискориентированный проектно-процессный подход – системная основа конкурентоспособности машиностроения. В сборнике: Человеческий капитал в новой реальности. материалы пленарной международной научно-практической конференции в рамках VI международного Московского академического экономического форума «Российская экономика 2024+: новые решения в новой реальности». Москва, 2024. С. 89–97.

Панов А.Н.
к.т.н., главный эксперт
ЮРС-РУСЬ
Россия, Санкт-Петербург
a.panov@tut.by
Ромашова Е.Ю.
младший научный сотрудник
ИМАШ РАН
Россия, Москва
romashova@imash.ru
Габур С.П.
инженер
ИМАШ РАН
Россия, Москва
sp-vp@yandex.ru

СТРАТЕГИЯ СИСТЕМНОГО ПРОРЫВА. ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА, СОКРАЩЕНИЯ ПЕРИОДА СОЗДАНИЯ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА. КАЧЕСТВО И РИСКИ

Аннотация. Современное машиноведение в рамках жизненного цикла техники и технологий развивается по двум ключевым направлениям: созданию математических и электронных моделей в сочетании с системами поддержки интеллектуальной деятельности, а также внедрению рискориентированной методологии. Их синергия позволяет оптимизировать баланс «качество – стоимость – риски» для машиностроительной продукции, повысить её конкурентоспособность и значительно сократить этапы проектирования и освоения производства. В настоящем докладе анализируются актуальные проблемы, перспективы совершенствования методологической базы, а также модели и методы оценки допустимости конструкторско-технологических рисков в аспектах качества, надёжности и безопасности. Особое внимание уделяется интеграции физических экспериментов с математическим, электронным и численным моделированием. Предлагается система критериев, основанных на рискориентированном подходе, которые определяют допустимость замены физических испытаний расчётными моделями.

Ключевые слова: качество, проектирование, риски, физические и математические модели, средств поддержки интеллектуальной деятельности, машиностроение, машиноведение.

Panov A.N.
Candidate of Technical Sciences, Chief Expert
URS-RUSS
Russia, Saint-Petersburg
a.panov@tut.by
Romashova E.Yu.
Junior Researcher
IMASH RAS
Russia, Moscow
romashova@imash.ru
Gabur S.P.
Engineer

IMASH RAS
Russia, Moscow

STRATEGY OF SYSTEM BREAKTHROUGH. INCREASE IN INTELLECTUAL LABOR PRODUCTIVITY, REDUCE THE PERIOD OF CREATING NEW PRODUCTS AND PREPARING PRODUCTION. QUALITY AND RISKS

Abstract. Modern mechanical engineering within the framework of the life cycle of equipment and technologies is developing in two key areas: the creation of mathematical and electronic models in combination with intellectual activity support systems, as well as the implementation of risk-oriented methodology. Their synergy allows for optimizing the balance of «quality – cost – risks» for engineering products, increasing their competitiveness, and significantly reducing the stages of design and production development. This report analyzes current issues, prospects for improving the methodological framework, as well as models and methods for assessing the acceptability of design and technological risks in terms of quality, reliability, and safety. Special attention is paid to the integration of physical experiments with mathematical, electronic, and numerical modeling. A system of criteria based on a risk-oriented approach is proposed, which determines the permissibility of replacing physical tests with computational models.

Keywords: quality, design, risks, physical and mathematical models, intellectual activity support tools, mechanical engineering, and machine science.

Развитие машиноведения и машиностроения, в настоящее время, происходит по нескольким направлениям. Следует выделить разработку математических моделей, численных методов и т.п., а также программного обеспечения для моделирования физических объектов, что снижает трудоемкость создания новой техники и технологий, а также сокращает ресурсы на постановку продукции на производство за счет уменьшения проведения испытаний, обработки значительных массивов накопленной информации (базы знаний и данных) и т.д.

Особое место с 60-х годов XX века [1–4] занимает, интенсивно развивается направление по созданию и применению встроенного в технику и технологии программного обеспечения, а также средств поддержки интеллектуальной деятельности («artificial intelligence»). Ошибочно либо преднамеренно (методики маркетинга) на наш взгляд, называется «искусственный интеллект». Интеллекта в программном средстве конечно же нет. Информационные технологии повышают производительность созданные человечеством глобальные массивы данных и знаний, без развития этого направления на практике невозможно реализовывать мероприятия для достижения целей человечества. Для однозначного взаимопонимания и применения термины (ранее указанных в научной и технической литературе) уже стандартизируются (ГОСТ Р 57700,37 и др.) соответствующие термины и определения (математическая модель и т.д.). Без стандартизации терминологического аппарата не представляется адекватным использование, и развитие средств поддержки интеллектуальной деятельности.

Вторым направлением развития машиноведения и машиностроения с 60-х годов XX века является идентификация [5] критичности оценочных категорий по предназначению при испытаниях и контроле. На основе детерминированного, допускового, статистического и вероятностного (например, прогнозирование надежности техники и т.д. [6]) подходов в настоящее время интенсивно развивается используется методологии, модели и методы, основанные на рисках. Указанное представлено как в отраслевых исследованиях и разработках [8–12], а также в фундаментальных работах (например, «Безопасность России») [7]. Наиболее общим определением термина предлагается применять «риск – воздействие неопределенности» (ISO 9000).

Следует отметить, что программное обеспечение – модели и методы информационных технологий в процессе их применения создают дополнительные риски, которые чрезмерно могут влиять на результат как при их использовании при замене физических моделей, так и при обработке массивов данных и знаний. Жизненный цикл объектов – техники и технологий включает этапы, в том числе, при декларации о возможности применения – замене физических испытаний на расчетные модели в обязательных и добровольных технических нормативно-правовых актов (Технические регламенты, ГОСТ и т.п.) [16]. Указанное создает дополнительные уязвимости в системе верификации и валидации результатов проектирования, производства, эксплуатации, восстановления и утилизации техники. Таким образом, возможны не приемлемые ущербы при использовании как средств поддержки интеллектуальной деятельности, так и при замене физических моделей на расчетные.

Перечисленные проблемы, имеющиеся задачи, указанные направления развития и их взаимосвязь требуют дальнейшего интенсивного изучения, чему и посвящена представленная публикация.

Целью работы является проведение исследований, развитие и применение методологии, моделей и методик обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков объектов машиностроения на основе использования математических моделей, численных методов, а также средств поддержки интеллектуальной деятельности для повышения производительности, сокращения периода создания продукции и подготовки производства.

Методология. Для разработки модели стандартизации в металлургии и развития методологии рискориентированного проектирования продукции и процессов в части управления вероятностью соответствия характеристик в зависимости от значимости последствий и интегрального ущерба от первопричины до конфигуратора (в котором функционирует созданная с применением материалов и профилей социотехническая система) использованы, либо развитые следующие термины с соответствующими определениями:

план управления рисками (risk control plan): документ, созданный для управления первопричинами/источниками возникновения рисков несоответствий, идентифицированными на основе актуальных знаний науки, техники и технологий путем применения соответствующих средств управления

факторами, влияющими на уязвимость систем, для достижения требуемых вероятностей приемлемых интегральных ущербов.

пригодность (performance): измеримый результат (ISO 9000).

характеристика с установленной значимостью приоритета; приоритизированная характеристика (prioritize characteristic): характеристика объекта с присвоенной значимостью приоритета для заинтересованных сторон, обоснованной взаимосвязями явлений, систем и процессов.

риск (risk): воздействие неопределенности (СТБ ISO 9000).

средство поддержки интеллектуальной деятельности; искусственный интеллект (artificial Intelligence): техническая система, обладающая возможностью получать, преобразовывать и использовать знания и данные, хранящиеся в виде моделей, для решения одной или нескольких задач поддержки принятия решения человеком-оператором, с наличием способности коррекции выходных данных на основе обратной связи.

стандарт (standard): оптимальным образом упорядоченная, повторяющаяся деятельность при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами. В действующем законодательстве может использоваться иное определение термина. Данное определение применяется в рамках рискориентированного мышления.

угроза (threat): потенциальный источник опасности, вреда или другого нежелательного результата (СТБ ISO 31073).

ущерб (damage): потенциальная или фактическая потеря.

Примечания:

1 Ущерб по значимости может быть пренебрежимым, приемлемым и чрезмерным.

2 Ущерб по воздействию может быть прямым, косвенным и отдаленным.

3 Ущерб в конечном итоге при анализе рисков имеет финансовый эквивалент.

уязвимость (vulnerability): непригодность системы противостоять угрозам при достижении цели.

фрактал (fractal) <система менеджмента>: упорядоченная, устойчивая информационная структура/код, задающая возможности и ограничения для взаимодействия/развития открытых самоорганизующихся сложных социотехнических систем путем синтеза подобных себе структур на различных уровнях их иерархии, позволяющая оптимально обеспечивать требуемую результативность/ эффективность и защищенность.

цель (objective): результат, который будет достигаться (СТБ ISO 9000).

эффективность (efficiency): связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами (ISO 9000).

В результате проведенных исследований предложены рискориентированные проектно-процессные модели:

жизненного цикла продукции и этапов систем менеджмента знаний и инноваций в рамках проектно-процессного подхода, используемого в организации (рис. 1);

оптимизации затрат на достижение требуемых знаний: игнорирование; приобретение; создание (рис. 2);

достижения приемлемых рисков при замене физических моделей на математические – «ущерб – вероятность – математическое ожидание – вариация» (рис. 3). Указанное позволяет определить приемлемость рисков замены физических моделей на математические.

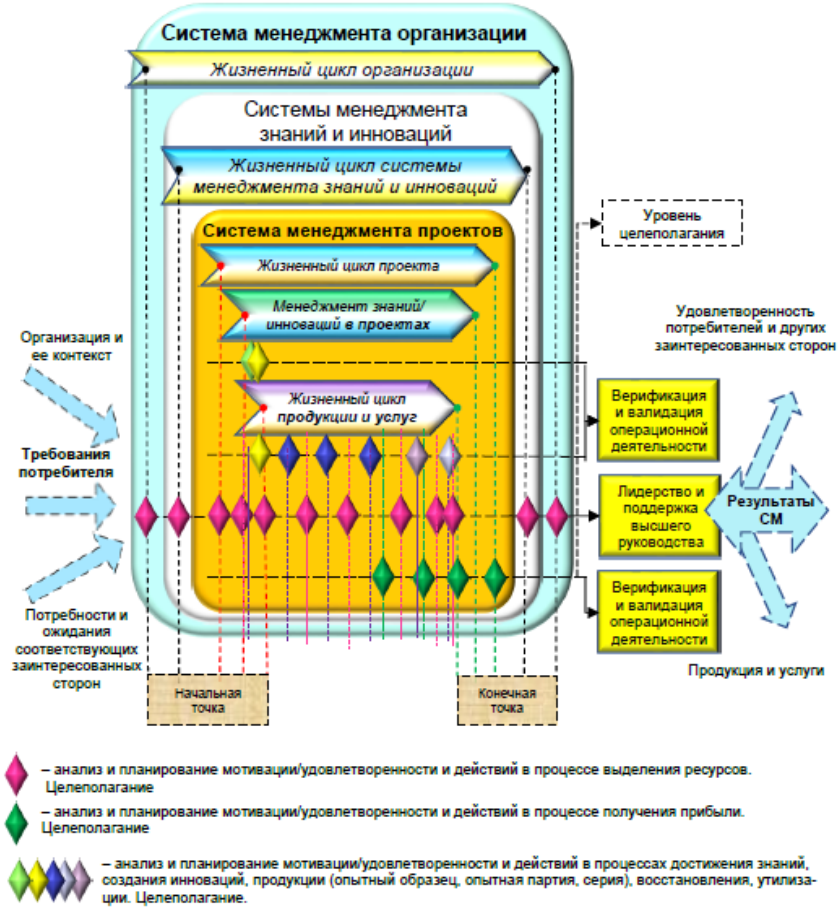


Рис. 1. Модель жизненного цикла продукции и этапов систем менеджмента знаний и инноваций в рамках проектно-процессного подхода используемого в организации



Рис. 2. Модель оптимизации затрат на достижение требуемых знаний: игнорирование; приобретение; создание

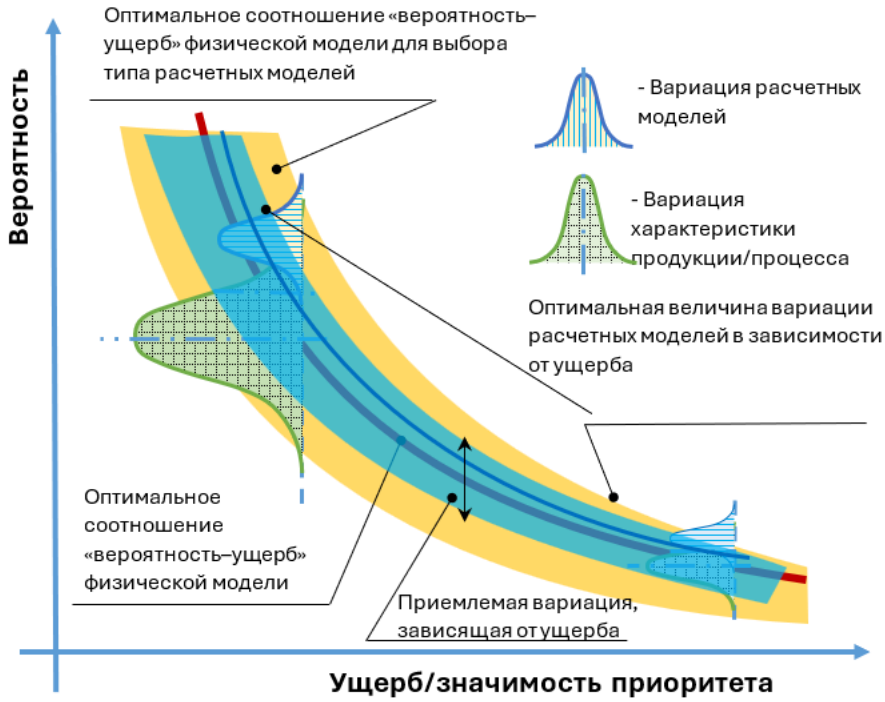


Рис. 3. Модель достижения приемлемых рисков при замене физических моделей на математические –«ущерб-вероятность – математическое ожидание- вариация»

Для реализации моделей предложено на втором этапе управлять рискам ввести новые виды конструкторско-технологических документов, в том числе для управления рисками расчетных моделей, таких как «План управления рисками», «Анализ рисков», «Деревья причинно-следственных связей до источника отказа».

Результаты исследований, разработок для машиноведения и применения в практике машиностроения.

Развиты и получили применение на практике методологии, модели и методики обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков объектов машиностроения на основе использования математических моделей, численных методов, а также средств поддержки интеллектуальной деятельности на основе развитой методологии и алгоритмов риск ориентированного проектирования техники и технологий:

1. Развито применение математического моделирования рискориентированного подхода при разработке технических регламентов и технических нормативно-правовых актов (ТР, ГОСТ и т.п.) для обоснования нормируемых показателей при достижении приемлемых интегральных рисков соответствия для типа продукции и процессов тиражирования, в том числе для численных моделей. Разработана и широко используется серия государственных и межгосударственных стандартов на методики применения подхода, основанного на рисках при проектировании, производстве (СТБ 16949, СТБ 1506 и т.д.) [8–10].

2. Разработаны и применены модели и методы, в том числе и гармонизированные физические модели и электронные, цифровые модели и численные (МКЭ) методы, на этапе разработки типа конструкции и процессов тиражирования объектов машиностроения. Обосновано и применено управление конструкторско-технологическими рисками для зон зарождения повреждения – источников отказов конструкций. Указанное позволило сократить сроки и затраты на оценку по результатам физических испытаний и прогнозировать ресурс при варьировании конструкторско-технологических факторов на основе расчетно-экспериментальных методов для достижения приемлемых рисков соответствия.

Предложено применение планов управления и анализа рисков «типа продукции», «типа процессов тиражирования» [12].

3. Развиты критерии адекватности и достижения приемлемых конструкторско-технологических рисков допустимости совместного применения и/или исключения физических испытаний при использовании математических, электронных и цифровых моделей, численных методов в технических регламентах и нормативно-правовых актах, а также при создании и совершенствовании конструкций для достижения приемлемых рисков соответствия процессов верификации и валидации [15].

4. Идентифицированы перспективные направления исследований и использования на практике полученных результатов (расширение видов моделирования на основе рискориентированного подхода, уточнение критериев и т.д.).

Научный доклад выполнен в рамках выполнения научной темы FFGU-2024-0024.

Список литературы

1. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.1 Системы общения и экспертные системы: Справочник / Под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990, – 464 с.: ил.

2. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.2 Модели и методы: Справочник / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990, – 464 с.: ил.

3. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.3 Программные и аппаратные средства: Справочник / Под ред. В.Н. Захарова, В.Ф. Хорошевского. – М.: Радио и связь, 1990, – 368 с.: ил.

4. Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кьюсиака; Пер. с англ. А.П. Фомина; Под ред. А.И. Дащенко, Е.В. Левнера. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.: ил.

5. Технологические методы и средства контроля в самолетостроении. Под ред. канд.техн. наук И.М. Дунаева. М., Машиностроение, 1973, стр.148.

6. Прогнозирование надежности тракторов / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко, И.Ш. Чернявский/ Под общ. Ред. В.Я. Аниловича. – М.: Машиностроение, 1986-224 с., ил.

7. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.

8. Горбацевич, М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/ М.И. Горбацевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общ.ред. А.Н. Панова. – Мн. Технопринт, 2005. – 264 с.: ил.

9. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов/ Н.А. Махутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др.; под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2009. – 499 с.

10. Панов, А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрецов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общ.ред. А.Н. Панов. – Минск: БГЦА, 2009.482 с., ил.

11. В.В. Алексеев, С.И. Гавриленко, А.Н. Панов, В.Е. Столяров. Математические модели и методики обеспечения приемлемых исков информационно-измерительных и управляющих систем транзитных газопроводов. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 160 с.

12. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Основы методологии рискориентированного проектирования в машиностроении/ Машиностроение и инженерное образование. М. 2024 г. №1–2, с 8–16.

13. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Рискориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21–34.

14. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Дуализм управления рисками технических систем. применение средств повышения производительности интеллектуальной деятельности/ 8-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (FRITME-2024).

15. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Складнова М.С. К вопросу о рисках применения цифровых моделей в машиноведении/ 8-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (FRITME-2024).

16. Ромашова, Е. Ю. К вопросу о рисках замены физических моделей на цифровые двойники в технических нормативных актах при верификации соответствия требованиям / Е. Ю. Ромашова // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : Научные труды IX Международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора Хрущова Михаила Михайловича, Москва, 11–13 ноября 2025 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2025. – С. 290–291.

Туркова В.Н.
старший преподаватель кафедры юриспруденции
ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»
Россия, Иркутск
nikolaevna_ur@mail.ru

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВНЕДРЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ЭКСПЕРТУ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗЪЯТИЯ СЛЕДОВ НА МЕСТЕ ПРЕСТУПЛЕНИЯ

Аннотация. На сегодняшний день существует потребность в создании специального криминалистического фотоаппарата для экспертов-криминалистов. Данный фотоаппарат должен включат все необходимые для эксперта настройки и удобства работы не смотря на непогодные условия. В том числе рекомендовано включение УФ-объектива для сбора необходимой информации. В связи с этим необходимы новые технологические решения.

Ключевые слова: судебная фотография, стандарты качества, калькулятор климатических условий, правоохранительная деятельность.

Turkova V.N.
Senior Lecturer of the Department of Law
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
Irkutsk, Russia
nikolaevna_ur@mail.ru

TECHNICAL INNOVATIONS NECESSARY FOR EXPERTS TO SEIZE TRACES AT THE CRIME SITE

Abstract. Today, there is a need to create a special forensic camera for forensic experts. This camera should include all the necessary settings and features for the expert to work comfortably, regardless of the weather conditions. It is also recommended to include a UV lens for collecting the necessary information. Therefore, new technological solutions are required.

Keywords: forensic photography, quality standards, climate calculator, and law enforcement.

Эксперт-криминалист, фиксирующий доказательства, сталкивается с широким спектром фотографических задач на местах преступлений. Запись важнейших доказательств в виде отпечатков пальцев, следов обуви или других отпечатков часто является проблематичной и уязвимой средой. Изображения (объекты) на месте преступления могут быть чрезвычайно хрупкими или наоборот габаритными, а также трудноразличимыми. Цвет или текстура фона легко могут заглушить тонкие детали. Изогнутые, блестящие или неровные поверхности могут препятствовать попыткам запечатлеть все детали на одном кадре. Особенно сложно проводить фотографирование объектов в вечернее или ночное время, когда требуется дополнительные источники света.

Существуют специальные флуоресцентные пленки с изменением цвета, которые могут помочь зафиксировать скрытые отпечатки на ножах, пистолетах, гильзах и других металлических поверхностях. В этом случае

есть потребность и необходимость в создании (внедрения) в фотоаппаратную технику для экспертов-криминалистов создать и улучшить специальные флуоресцентные линзы или фильтры (как указано на рисунке 1).



Рис. 1. Ультрафиолетовая оптика

Объектив УФ-камеры это оптический объект, предназначенный для достижения целевого качества изображений. Это индивидуальный кусок стекла, установленный под пластиковой конструкцией или рамой. Стеклянная рама бывает разных размеров. Для желаемой оптимальной работы объектив может быть изготовлен из одного или нескольких слоёв материалов. Проще говоря, ультрафиолетовые линзы защищают объективы камер от повреждений, таких как царапины, пыль и порезы, сколы, микрочастицы. Что касается еще одной из проблем, выявленных в работе эксперта-криминалиста неблагоприятные погодные условия, попадание инородных предметов.

УФ-объектив или фильтр устанавливается перед объективом камеры, чтобы предотвратить попадание избытка света, пыли или тепла в камеру. Это очень полезно при проведении съёмок на открытом воздухе. При этом ультрафиолетовый объектив обеспечивает точное изображение без ущерба качеству. Благодаря светопоглощающей способности ультрафиолетового света он раскрывает каждую мелкую деталь.

Кроме УФ – объектива можно говорить и рассматривать концепцию дополнительной лампы (источник света)? встроенной в модель фотоаппарата или встраиваемый в устройство вспышки. УФ-свет – это тип электромагнитного излучения с длинами волн короче видимого света, но длиннее рентгеновских лучей. В судебной экспертизе обычно используются два основных типа ультрафиолетовых излучений:

UV-A (длинноволновый): 320–400 нм, менее интенсивный, часто используется для общих поисков.

УФ-С (коротковолновый): 100–280 нм, более интенсивный, эффективный для выявления определённых веществ.

Работа ультрафиолетового света заключается в освещении определённых объектов, они поглощают энергию и вновь излучают её в виде видимого света – процесс, известный как флуоресценция. Многие биологические материалы и синтетические вещества флуоресцентируют под воздействием ультрафиолета, что облегчает их обнаружение. А обнаружение и идентификация биологических жидкостей на месте преступления являются очень

важными аспектами судебной науки (как указано на рисунке 2). Спектроскопические методы, такие как УФ–видимая абсорбция, считаются высоконадежными для подтверждения присутствия, например, крови в качестве пятна. И в этом случае, можно сделать вывод, что доказательства не спрячутся от ультрафиолетового излучения.



Рис. 2. Ультрафиолетовый фонарь

Также существует необходимость внедрения автоматического калькулятора в виде, программного обеспечения который, будет залогом успешной работы эксперта. В этом случае у эксперта появляется набор инструментов в виде меню, где происходит выбор температурного режима, климатических условий, времени суток и иным параметрам для качественного изображения следаобъекта (как указано на рисунке 3).



Рис. 3. Технические настройки

Когда калькулятор выполняет вычисление, в программе возникает небольшая задержка примерно на полсекунды, так как калькулятор должен классифицировать все изображения в течение этого кадра.

Анализ вышеизложенных фактов, как например, источник ультрафиолетового света эффективен для обеспечения достаточного контраста кровавых пятен, которые встречаются на предметах красного или фиолетового цвета. Такие пятна часто настолько хорошо выцветают на заднем плане, что их невозможно сфотографировать. Ультрафиолетовый свет часто обеспечивает достаточный контраст между фоном и окрашиванием, чтобы эти пятна можно было визуализировать на фотографии. Кровь, скрытая под краской. Нередко преступник пытается избавиться от потенциально компрометирующих улик. Это может включать закрашивание участков, подвергшихся воздействию крови. Для невооружённого глаза почти невозможно увидеть, что пятно крови было закрашено. Однако с помощью ультрафиолетового света можно обнаружить пятна крови, скрытые краской. Поэтому необходимо внедрить комплекс настроек в фотоаппарат, с которым будет работать эксперт на месте преступления. Передовые методы визуализации с использованием специальной оптики помогут судебным экспертам изучать оставленные следы, не нанося им повреждений.

Список литературы

1. Репин, А. В. Анализ типичных ошибок при оформлении фототаблиц к протоколам осмотров мест происшествий / А. В. Репин, Е. Б. Мельников // Вестник Сибирского юридического института МВД России. – 2018. – № 4(33). – С. 88–95. – DOI 10,51980/2542-1735_2018_4_88. – EDN YRJIHR.

2. Малыхин, А. В., Малыхина, Е. А. Цифровая фотография как эффективный способ современного технико- криминалистического обеспечения раскрытия, расследования и предупреждения преступлений // Криминалистика: вчера, сегодня, завтра. – 2021. – № 1. – С. 102–108. – DOI: https://doi.org/10,24412/2587- 9820-2021-1-102-108.

Царегородцев Р.А.
заместитель декана по научной работе, старший преподаватель
кафедры Б5 «Теоретическая и прикладная лингвистика
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Россия, Санкт-Петербург
romants@inbox.ru
Кольчугина Е.М.
студент
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Россия, Санкт-Петербург
E-kolchugina@list.ru
Евсеев А.О.
студент
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
Россия, Санкт-Петербург
evseevaleksandr399@gmail.com

ЦИФРОВАЯ ЗРЕЛОСТЬ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА: МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ НА РОССИЙСКИХ ЗАВОДАХ

ннотация. В статье рассмотрена проблема перехода российских заводов от бумажного учёта к цифровому управлению качеством. Авторы предложили пятиуровневую модель оценки цифровой зрелости систем менеджмента качества (СМК). Модель основана на трёх критериях: автоматизация сбора данных, связь с ERP/PLM-системами и использование прогнозной аналитики. Данные получены при опросе 45 предприятий машиностроения и металлургии в 2025 году. Результаты показали, что 62% заводов находятся на начальных уровнях (1–2), где главные инструменты – это электронные таблицы и разрозненные базы данных. Только 8% предприятий достигли уровней 4–5, где качество управляется через сквозную цифровизацию и элементы искусственного интеллекта. Выявлены главные проблемы: высокая стоимость внедрения (73% ответов), несовместимость старых систем с новыми (58%) и нехватка специалистов, которые знают и качество, и цифровые технологии (67%). Предложен план поэтапного повышения цифровой зрелости СМК.

Ключевые слова: цифровая зрелость, система менеджмента качества, цифровизация, ГОСТ Р ИСО 9001, прогнозная аналитика, управление качеством, российские предприятия, барьеры цифровизации.

Tsaregorodtsev R.A.
Deputy Dean for Research, Senior Lecturer
of the B5 Department of Theoretical and Applied Linguistics
D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH»
Russia, Saint Petersburg
romants@inbox.ru
Kolchugina E.M.
Student
D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH»
Russia, Saint Petersburg
E-kolchugina@list.ru
Evseev A.O.

Student
D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH»
Russia, Saint Petersburg
evseevaleksandr399@gmail.com

DIGITAL MATURITY OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS: ASSESSMENT MODEL AND IMPLEMENTATION EXPERIENCE IN RUSSIAN FACTORIES

Abstract. The article discusses the problem of Russian factories' transition from paper-based accounting to digital quality management. The authors propose a five-level model for assessing the digital maturity of quality management systems (QMS). The model is based on three criteria: automation of data collection, integration with ERP/PLM systems, and the use of predictive analytics. The data was obtained through a survey of 45 engineering and metallurgical companies in 2025. The results showed that 62% of factories are at the initial levels (1–2), where the main tools are spreadsheets and fragmented databases. Only 8% of enterprises have reached levels 4–5, where quality is managed through end-to-end digitalization and elements of artificial intelligence. The main challenges identified were the high cost of implementation (73% of responses), the incompatibility of old systems with new ones (58%), and the lack of specialists who know both quality and digital technologies (67%). A plan has been proposed for gradually increasing the digital maturity of the QMS.

Keywords: digital maturity, quality management system, digitalization, GOST R ISO 9001, predictive analytics, quality management, Russian enterprises, digitalization barriers.

Системы менеджмента качества по стандарту ГОСТ Р ИСО 9001-2015 остаются главным инструментом для поддержания стабильности процессов на большинстве российских заводов. Но старая модель СМК создавалась в то время, когда цифровые технологии не играли ключевой роли. Сбор данных о браке, разбор причин несоответствий, планирование действий – всё это долгие годы делали на бумаге или в простых таблицах Excel.

К 2025 году ситуация начала меняться. Крупные заказчики требуют полной прослеживаемости деталей по всей цепочке поставок. Кроме того, государственные программы цифровизации промышленности заставляют заводы пересматривать подходы к качеству. В рамках проекта «Экономика данных» Минпромторг запустил отраслевые платформы для обмена данными о качестве.

Авторы попытались ответить на вопрос – готовы ли сами предприятия к таким переменам? Для этого была разработана количественная модель оценки цифровой зрелости СМК, и модель применили на реальных заводах. Результат оказался неоднозначным: хотя расходы на ИТ растут, реальный прогресс в цифровизации качества отстаёт от ожиданий.

Исследование проводилось с сентября 2025 по март 2026 года. Использовалась смешанная стратегия: сначала создали теоретическую модель оценки, затем провели опрос и интервью со специалистами по качеству на 45 предприятиях. Выборка включала машиностроительные заводы, металлургические комбинаты и предприятия оборонно-промышленного ком-

плекса из семи регионов России. Выборка не является строго репрезентативной, но она охватывает основные типы производств, где требования к качеству наиболее жёсткие.

Модель цифровой зрелости СМК построена на анализе пяти областей:

Сбор и запись данных о качестве

Хранение и систематизация информации

Анализ и отчёты

Управление корректирующими и предупреждающими действиями

Связь со смежными системами

Для каждой области были заданы пять уровней зрелости (1 – начальный, 5 – оптимальный). Респонденты сами оценивали своё предприятие по шкале Лайкерта. Дополнительно собирались данные о годовом бюджете на ИТ в службе качества, количестве сотрудников, занятых цифровой обработкой данных, и о главных проблемах при внедрении.

Главное ограничение метода – субъективность самооценки. Чтобы его снизить, авторы частично проверили ответы, запросив скриншоты используемых систем и проведя 12 дополнительных интервью с ИТ-директорами.

Общий уровень цифровой зрелости. Распределение предприятий по уровням смещено влево. Большинство (62%) находятся на уровнях 1 или 2. Это значит, что данные о браке в цехах собирают вручную, потом переносят в Excel или Access, отчёты готовят раз в неделю или месяц. На уровне 3 (систематическая работа с базами, частичная автоматизация) находятся 24% компаний. Уровня 4 (сквозная цифровизация, связь с ERP, панели в реальном времени) достигли 6%. Уровня 5 (прогнозная аналитика, автоматическое выявление причин отклонений) – только 2% (одно предприятие). 8% не смогли точно определить свой уровень из-за разрозненности процессов.

Различия по отраслям. Металлургические комбинаты оказались более продвинутыми: 40% из них достигли уровня 3. Это связано с тем, что в металлургии давно работают системы сбора данных с датчиков (SCADA). Но эти данные редко напрямую связаны с СМК – чаще их используют технологи, а служба качества получает выгрузки после факта. В машиностроении разброс большой: от уровня 1 до уровня 4. Лидеры – заводы, которые поставляют детали автоконцернам: те требуют электронные протоколы качества на каждую партию. В ОПК цифровизация качества идёт медленно из-за требований секретности: облачные решения запрещены, даже внутренние сети часто изолированы.

Барьеры. Три главные проблемы, названные респондентами:

Высокая стоимость специального ПО для управления качеством (73%).

Несовместимость старых производственных систем с новыми цифровыми инструментами (58%). Станки с ЧПУ 1990-х годов, которые до сих пор работают, не имеют цифровых выходов для передачи данных о браке.

Нехватка кадров, которые знают и методологию качества, и цифровые технологии (67%). Обычные инженеры по качеству не умеют работать с

SQL, Power BI, а молодые ИТ-специалисты не разбираются в статистическом управлении процессами.

Экономические оценки. Предприятия попросили назвать годовой экономический эффект от цифровизации СМК (или ожидаемый, если внедрение ещё не закончено). Те, кто достиг уровня 3 и выше, оценили снижение затрат на брак (внутренний брак, жалобы клиентов, доработки) в среднем на 18% за два года после перехода. При этом средние вложения в цифровизацию СМК (софт, доработка систем, обучение) для предприятий уровня 3 составили 4,2 млн рублей. Срок окупаемости – около двух лет. Для перехода на уровень 4 требуются дополнительные вложения в интеграцию и аналитику, срок окупаемости растягивается до 3–4 лет, что останавливает многие компании.

Пример успешного внедрения. На одном машиностроительном заводе (Нижегородская область) внедрили систему, в которой операторы на каждой операции вносили данные о замерах через планшеты с готовыми списками причин отклонений. Система автоматически подсвечивала выходы за границы нормы и отправляла задание мастеру на настройку оборудования. Через полгода брак снизился на 27%, время реакции на отклонение – с четырёх часов до 20 минут. Но главным фактором успеха стала не технология, а изменение процесса: до этого мастера игнорировали бумажные отчёты, потому что те готовились с задержкой.

На основе собранных данных предложен пятиэтапный план повышения цифровой зрелости СМК. Этот план учитывает особенности российских заводов: ограниченные бюджеты, старое оборудование, нехватку нужных специалистов.

Этап 1 (0–6 месяцев). Переход от бумажных журналов к общей электронной таблице (например, Google Sheets или Excel с общим доступом). Это не требует затрат, но упорядочивает данные. Главное – назначить ответственного за ведение и ввести стандартные поля.

Этап 2 (6–12 месяцев). Внедрение простой базы данных (MS Access или облачный аналог) со справочником дефектов и причин. Обучение персонала работе с интерфейсом. Параллельно – выявление мест, где цифровизация даст наибольший эффект (например, участок с частыми поломками).

Этап 3 (1–2 года). Покупка модуля управления качеством в составе уже используемой ERP-системы (1С:УПП, SAP, Галактика). Связь со складским учётом для прослеживаемости партий. Автоматическое создание отчётов по главным показателям качества (процент брака, общие затраты на качество).

Этап 4 (2–3 года). Организация автоматического сбора данных с измерительных приборов (приборы с цифровым выходом) и от операторов через терминалы сбора данных. Внедрение панелей с данными в реальном времени.

Этап 5 (3–5 лет). Применение методов прогнозной аналитики (регрессия, случайный лес) для предсказания вероятности брака по параметрам процесса. Автоматическая настройка режимов работы.

Авторы не утверждают, что все заводы должны стремиться к уровню 5. Для многих достаточно уровня 3. Но главное – это осознанный выбор, а не просто реакция на проблемы.

Цифровизация управления качеством в российской промышленности идёт медленно и неравномерно. Две трети предприятий всё ещё работают с данными о качестве вручную или через разрозненные таблицы. Экономия на цифровизации обходится дороже, чем её внедрение: данные показывают, что переход на уровень 3 снижает затраты на брак в среднем на 18% с окупаемостью около двух лет. Однако главный барьер не технический и не финансовый – это разрыв в кадрах. Специалисты по качеству не владеют цифровыми инструментами, ИТ-специалисты не понимают задач управления качеством. Без преодоления этого разрыва любые вложения в софт и датчики останутся малоэффективными. Поэтому помимо технологических рекомендаций предлагаются системные программы переподготовки инженеров по качеству по направлениям «Анализ данных в управлении качеством» и «Цифровые двойники процессов». Только сочетая три компонента – людей, процессы, инструменты – можно добиться устойчивого роста зрелости.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 32 с.
2. Алексеева Е.В., Смирнов Д.А. Цифровая трансформация систем менеджмента качества на промышленных предприятиях // Стандарты и качество. – 2025. – № 3. – С. 44–49.
3. Минпромторг РФ. Доклад о ходе реализации национального проекта «Экономика данных» в части цифровизации промышленности. – 2025. – URL: https://minpromtorg.gov.ru/ (дата обращения: 25.04.2026).
4. Васильев П.Н., Кузнецова О.Л. Оценка цифровой зрелости систем менеджмента качества: методологический подход // Методы менеджмента качества. – 2024. – № 6. – С. 22–29.
5. Обзор российского рынка PLM/ERP систем 2025 / CNews Analytics. – 2025. – URL: https://www.cnews.ru/ (дата обращения: 24.04.2026).
6. Качество 4.0: как предприятия ОПК внедряют цифровые инструменты // Оборонный вестник. – 2026. – № 2. – С. 18–23.
7. Международная академия качества. Рекомендации по цифровизации СМК для малых и средних предприятий. – М.: МАК, 2025. – 104 с.
8. Сафин Р.И., Гатауллина Л.А. Человеческий фактор в цифровой трансформации управления качеством // Управление качеством в современном производстве. – 2025. – № 4. – С. 50–57.
9. Промышленность России – 2025: статистический сборник / Росстат. – М., 2025. – 412 с.
10. ERP-модули управления качеством: сравнительный анализ. – 10,02.2026. – URL: https://www.it-world.ru/ (дата обращения: 25.04.2026).

Уланова А.В.
старший преподаватель кафедры менеджмента
в энергетике и промышленности
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, Москва
UlanovaAV@mpei.ru
Осинин М.Д.
студент
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, Москва
OsininMD@mpei.ru
Ерин Д.А.
студент
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, Москва
YerinDA@mpei.ru

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ЗАЩИТЫ ПРАВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ МАРКИРОВКИ ТОВАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые аспекты работы центра развития перспективных технологий в рамках проекта маркировки товаров на территории Российской Федерации (РФ) в системе «Честный знак». Представлена динамика изменения количества выявленной контрафактной продукции на рынке РФ в период с 2017 по 2022 годы. Определена роль оператора ООО «Оператор-ЦРПТ» в реализации проекта маркировки товаров на территории РФ в системе «Честный знак». Проведен анализ проблем, решаемых за счет внедрения маркировки, определена роль маркировки в экономике Российской Федерации. Представлены ссылки на нормативные акты с указанием ответственных за реализацию единой национальной системы цифровой маркировки, ведение перечня категорий товаров, подлежащих обязательной маркировке, а также меры ответственности (штрафы и ограничения) за отказ производителя от маркировки. Определены положительные и отрицательные аспекты влияния системы маркировки на состояние потребительского рынка и обеспечение защиты прав потребителей. Проведен анализ ожидаемого социально-экономического эффекта от внедрения обязательной маркировки как стратегии контроля качества и безопасности товаров на рынке РФ. Предложены решения по упрощению внедрения системы маркировки на различных предприятиях. Представлена динамика изменения отношения к маркировке со стороны частного сектора. Представлена оценка результатов функционирования системы маркировки товаров в РФ.

Ключевые слова: маркировка товаров, защита потребителей, цифровая экономика, контрафакт, качество товаров.

Ulanova A.V.
Senior Lecturer of the Department of Management in Energy and Industry
National Research University «MPEI»
Russia, Moscow
UlanovaAV@mpei.ru
Osinin M.D.
Student
National Research University «MPEI»
Russia, Moscow

OsininMD@mpei.ru
Erin D.A.
Student
National Research University «MPEI»
Russia, Moscow
YerinDA@mpei.ru

DIGITAL MODEL OF CONSUMER PROTECTION THROUGH THE LABELING OF GOODS ON THE TERRITORY OF THE RUSSIAN FEDERATION

Annotation. The article discusses the key aspects of the work of the Center for the Development of Advanced Technologies within the framework of the project of labeling goods in the territory of the Russian Federation (RF) in the Honest Mark system. The dynamics of changes in the number of identified counterfeit products in the Russian market in the period from 2017 to 2022 is presented. The role of the operator Operator-CRPT LLC in the implementation of the project for labeling goods in the territory of the Russian Federation in the Honest Mark system is determined. The analysis of the problems solved by the introduction of labeling is carried out, the role of labeling in the economy of the Russian Federation is determined. References to regulations are provided indicating those responsible for the implementation of the unified national digital labeling system, maintaining a list of categories of goods subject to mandatory labeling, as well as liability measures (fines and restrictions) for the manufacturer's refusal to label. The positive and negative aspects of the impact of the labeling system on the state of the consumer market and ensuring the protection of consumer rights are determined. The analysis of the expected socio-economic effect from the introduction of mandatory labeling as a strategy for quality control and safety of goods in the Russian market is carried out. Solutions are proposed to simplify the implementation of the labeling system at various enterprises. The dynamics of changes in the attitude to labeling on the part of the private sector is presented. An assessment of the results of the functioning of the product labeling system in the Russian Federation is presented.

Keywords: labeling of goods, consumer protection, digital economy, counterfeit, quality of goods.

Проблема контрафактной продукции существует давно и является актуальной для экономик разных стран. В России история подделок началась еще в 50-х годах прошлого столетия, когда среди населения распространялись самодельные музыкальные «пластинки на костях», сделанных кустарным способом на рентгеновских снимках. С развитием рыночной экономики теневой бизнес приобрел более масштабный характер, а с начала 90-х годов стал неконтролируемым. Для определения основных проблем российской экономики, связанных с контрафактом, и последующего поиска их решений, требуется провести анализ влияния контрафактной продукции на экономику Российской Федерации на протяжении последних лет.

Контрафакт – это та категория товаров, которую предприятие производит и выпускает без согласия правообладателя. Согласно ст. 14.10 КоАП РФ (Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях), контрафакт – это незаконное использование чужого товарного знака, знака обслуживания, наименования места происхождения товара или сходных с

ними обозначений для однородных товаров. То есть можно сказать, что контрафакт – это подделка оригинальной продукции с несоблюдением соответствующего закона, интеллектуальных прав [1].

В настоящее время в числе контрафактной продукции нередко встречаются подделки брендовой одежды, незаконно скопированные фильмы, книги, программы, а также фальсифицированные лекарства и алкоголь. Производство и распространение контрафактной продукции нарушает законы об интеллектуальной собственности и может повлечь административную, гражданско-правовую или уголовную ответственность.

Оборот контрафактной продукции создаёт существенные риски для всех участников рынка: приводит к значительным финансовым потерям, подрывает репутацию добросовестных продавцов и способен нанести потребителям как моральный, так и физический вред.

Согласно сведениям Минпромторга, с 2018 года на российском рынке выявлено более 6 миллионов единиц контрафактной продукции. Отследить перемещение и реализацию такого большого числа единиц контрафактной продукции без особой системы контроля было бы невозможно. Динамика изменения количества выявленных случаев оборота контрафактной продукции находилась на достаточно высоком уровне в период с 2017 по 2022 годы (рис. 1).

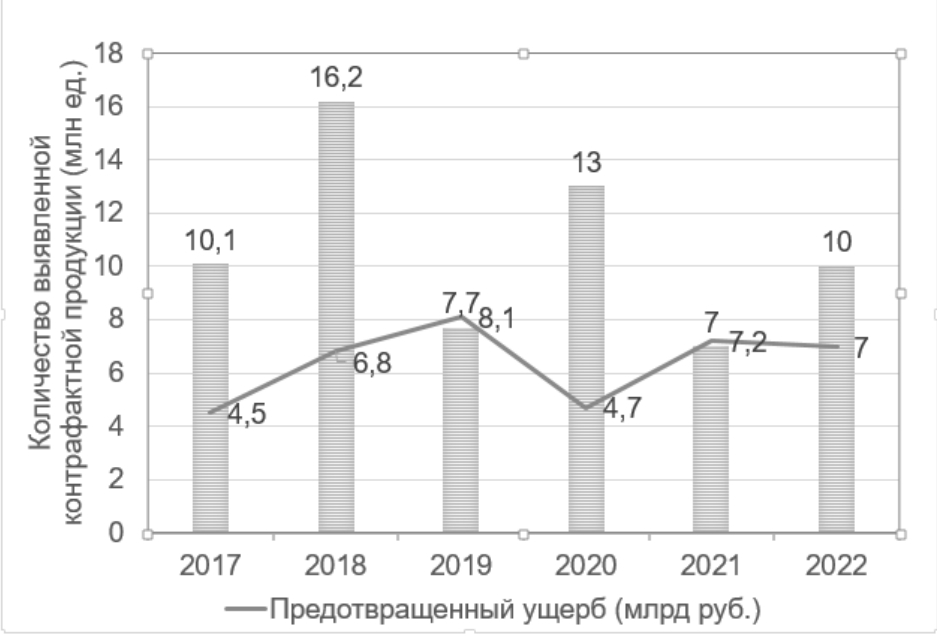


Рис. 1. Динамика изменения количества выявленной контрафактной продукции на рынке РФ в период с 2017 по 2022 годы

В 2018 году на российском рынке доля одежды и обуви занимали 30% от общего объема контрафактной продукции в России. Эта категория товаров занимала второе место, а на первом месте 45% – алкогольная и табачная продукция, оставшиеся 25% заняли такие категории, как парфюмерия лекарства и продукты питания и т.п. [2]

По данным ФТС (Федеральная таможенная служба), в том же 2018 году на рынке РФ было выявлено более 19,2 млн. единиц продукции, являющейся

контрафактом. Благодаря чему был предотвращён ущерб правообладателям, владельцам торговых знаков и интеллектуальной собственности на сумму более 4,2 млрд. рублей [2].

По результатам исследований компании BrandMonitor: в 2021 г. в России на контрафакт, реализуемый через Интернет, приходилось 525 млрд. руб. (8–13% от общего объема контрафакта) [1].

Информация о доле контрафакта в категориях наиболее фальсифицированных товаров по состоянию на 2020 год представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Категории товаров с наибольшей долей контрафакта в России за 2020 г. [2]

Стоит отметить, что данные по количеству выявленного контрафакта из разных источников отличаются. В ходе исследований компании «BrandMonitor» был проведен анализ объявлений о продаже товаров класса люкс в социальных сетях. По его результатам за период с июня 2018 по июнь 2020 года, было выявлено 3,5 млн постов с предложением контрафактной продукции.

Согласно данным, представленным на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, категория товаров «одежда и обувь» занимает второе место по масштабу среди групп товаров, подверженной риску оказаться контрафактной при покупке потребителем. С развитием онлайн-площадок наблюдается устойчивая тенденция роста предложений контрафактной продукции в интернете, при этом наблюдается расширении ассортимента товаров (подделок), однако наиболее крупные категории, подверженные данному явлению, остаются неизменными. В первую очередь это такие группы товаров как алкоголь, табачная продукция, одежда и обувь, лекарственные препараты. Трудно оценить влияние и полный ущерб от реализации контрафактных товаров на российском рынке, поскольку их фактический оборот включает в себя продукцию, произведённую на территории Российской Федерации. Основными причинами этой ситуации являются недостаточная информированность части населения о рисках приобретения контрафакта и их желание найти более выгодный вариант на рынке продукции для минимизации своих затрат. При этом для одной группы потребителей основной площадкой реализации данной продукции являются социальные сети и маркетплейсы, в то время как другая группа приобретает ее в торговых центрах и на рынках.

Развитие онлайн-площадок привело к снижению ресурсных затрат на распространение контрафакта на российском рынке. На онлайн-каналы сбыта приходиться около трети от общего объёма контрафакта.

Проблемы, обсуждаемые в статье и способы их решения:

- Контрафакт в российской экономике и способы борьбы с ним.
- Маркировка как способ борьбы с контрафактной продукцией.
- Эффективность метода маркировки в решении изначальной проблемы.
- Определение рисков и возможностей для успешной борьбы с контрафактом.

Методология. Маркировка в российской экономике.

Для борьбы с оборотом контрафактной продукции с 2016 года в России используется маркировка.

Маркировка – это нанесение условных знаков, букв, цифр, графических знаков или надписей на объект с целью его дальнейшей идентификации (узнавания), указания его свойств и характеристик.[3]

На сегодняшний момент маркировка продукции является надежным механизмом, при помощи которого государство противодействует контрафакту. Код маркировки, нанесённый на продукцию, содержит в себе информацию о движении товара на рынке. Внедрение системы маркировки обеспечивает бизнесу и государственным органам возможность прослеживания движения товаров на рынке от производителя до конечного потребителя. Эта система позволяет выявлять и изымать из оборота продукцию, которая была произведена незаконно.

Поскольку противодействие контрафактной продукции является прерогативой государства, оно должно обеспечиваться надлежащей нормативно-правовой базой и специальными структурами или проектами, находящиеся под контролем государственных органов. Задачей этих структур обозначена разработка и реализация системы маркировки товаров как ключевого инструмента противодействия контрафакту. В России для решения этой задачи назначен Центр развития перспективных технологий (ЦРПТ).

В соответствие с Распоряжением Правительства РФ от 3 апреля 2019 года № 620-р ООО «Оператор-ЦРПТ» – организация, назначенная государством ответственной за создание и работу национальной системы маркировки «Честный знак». Она же является её оператором. На практике это означает, что центр развития перспективных технологий:

- занимается созданием глобальных проектов в цифровой экономике и формированием необходимой экспертной и технологической инфраструктуры для таких проектов;
- реализует единую национальную систему цифровой маркировки и прослеживаемости товаров в России и ЕАЭС (Евразийский экономический союз) под брендом «Честный Знак» с 2018 года.

Основная задача системы цифровой маркировки – повысить уровень безопасности россиян, существенно снизить количество контрафакта и некачественных аналогов. Выполняется это посредством контроля всего жизненного цикла отечественного и частично иностранного товара, что позволяет гарантировать заявленное качество реализуемой продукции.

«Честный знак»– это система маркировки и прослеживания товаров из разных категорий, работающая на основе государственно-частного партнёрства. Перечень товаров, подлежащих правилам маркировки в настоящее время размещен на сайте системы «Честный знак» [4]. Помимо различных категорий товаров общего потребления, продуктов питания, лекарственных средств и товаров для детей, в систему регулярно добавляются пилотные проекты, которые после прохождения проверки, включаются в общий список категорий.

Работа системы «Честный знак» строится на основе общей модели, которая была официально утверждена в апреле 2018 года. В круг задач системы «Честный знак» входит:

- Нанесение идентификаторов на каждый производимый или ввозимый товар;
- Формирование общей информационной базы, в которой будут содержаться данные о полном жизненном пути товара, начиная от его изготовления (или ввоза) и заканчивая реализацией конечному потребителю, а также формирование общедоступного каталога для потребителей.

Центр развития перспективных технологий (ЦРПТ), который выступает оператором системы, разрабатывает индивидуальные коды Data Matrix для каждой единицы продукции. Производитель или импортёр запрашивает коды в системе и наносит их на упаковку товаров с помощью принтеров этикеток или типографским способом, затем отправляет отчет о нанесении кодов через систему «Честный знак».

Каждый участник цепочки товарооборота сканирует код и вносит данные в специальную систему «Честный знак». Этот код нельзя подделать – он просто не отобразится в каталоге товаров системы. Сканируя код, покупатель или контролёр видит, где товар произведён, кто его ввёз в страну и где он был продан. Основная задача маркировки – сделать путь следования товаров прозрачней. Любой покупатель сможет узнать, кто произвёл и откуда ввезен конкретный товар. Для производителей и импортёров маркировка позволяет снизить конкуренцию с продавцами контрафакта, которые осуществляют сбыт продукции по заниженным ценам. Кроме того, продавцы не могут реализовать товар с истекшим сроком годности, так как система не позволит кассиру завершить покупку. Сам код, состоит и двух частей, одна из которых, отвечающая за отслеживание товара, защищена криптографическим ключом.

На рисунке 3 представлен весь путь маркированной продукции от производства до потребителя. Вся информация о товаре для потребителя доступна в мобильном приложении.

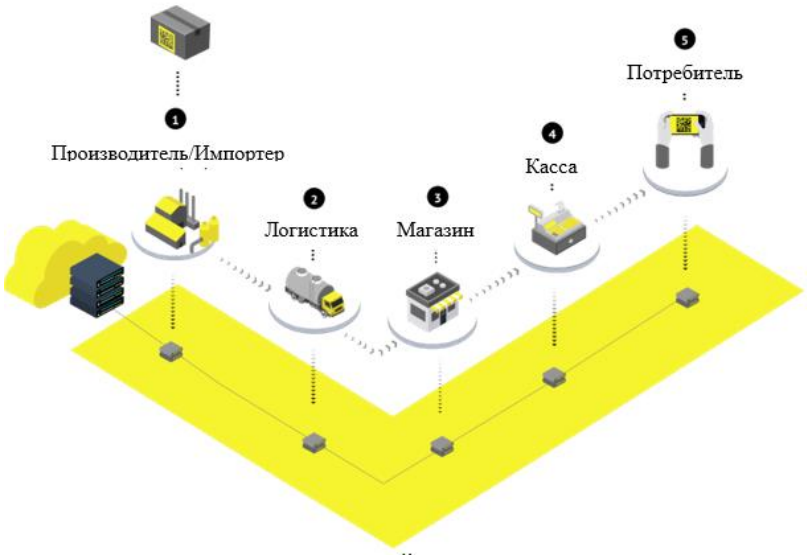


Рис. 3. Путь маркированной продукции от производства до потребителя [4]

В Российской Федерации предусмотрены штрафы и ограничения за отказ производителя от маркировки. Штрафы за отсутствие маркировки применяются не ко всем товарам, а только к тем, что входят в перечень обязательной маркировки через ЦРПТ. А этот перечень постоянно пополняется – система постепенно расширяет охват новых товарных категорий. Полный список категорий товаров актуализируется на сайте системы «Честный знак» [4]. На рисунке 4 представлены основные этапы внедрения обязательной маркировки отдельных категорий товаров, осуществляемой с начала 2019 года.



Рис. 4. Этапы введения обязательной маркировки с начала 2019 года [4]

Не всегда можно однозначно определить, подлежит ли конкретная товарная позиция обязательной маркировке. В этом случае следует обратиться к национальному каталогу товаров в системе «Честный знак» [5]. В нем содержатся описания всех подлежащих маркировке позиций с кодами ТН ВЭД (Товарная номенклатура внешнеэкономической деятельности Евразийского экономического союза) и ОКПД2 (Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности).

Нередко компании ошибочно полагают, что их продукция не подлежит обязательной маркировке, и осуществляют оборот товаров без нанесения

соответствующих кодов. В результате, при проведении контрольных мероприятий, такие организации могут быть привлечены к административной ответственности в виде штрафа. Ошибочная маркировка товаров, не включённых в обязательный перечень, влечёт дополнительные расходы для бизнеса. Нормативное регулирование системы маркировки осуществляется в рамках административного законодательства, а контроль за соблюдением требований возложен на уполномоченные органы (ФНС, Росалкогольрегулирование, Росздравнадзор и др.), которые на основе данных системы применяют штрафные санкции за нарушения [4].

Согласно статье 15.12 КоАП РФ предусмотрены штрафы за нарушения в сфере маркировки. Например, за производство и продажу товаров без нанесения кода маркировки: от 50 000 до 100 000 рублей, за нанесение недостоверной информации в коде: от 50 000 до 300 000 рублей. Для отдельных товарных групп (например, табак, алкоголь) предусмотрены более жесткие санкции вплоть до конфискации товара и приостановления деятельности.

Штрафы за оборот товаров без маркировки являются средствами привлечения к административной ответственности, уголовная ответственность наступает за организацию преступного сговора в крупном масштабе с целью умышленного обхода системы маркировки. В таких случаях предусмотрены санкции в виде штрафа до 1 млн руб. либо лишения свободы на срок до 5 лет.

Результаты. Анализ возможностей и рисков

По итогам 2025 года можно проанализировать как система маркировки повлияла на разные сферы национальной экономики:

- Для государства внедрение системы маркировки оказало положительное влияние на развитие элементов экономики: оно укрепило контроль за рынком и стимулировало развитие добросовестной конкуренции. Консолидированный экономический эффект для государственного бюджета составил 1,2 триллиона рублей, сокращение нелегального рынка на 79%. Так с 2018 по 2023 год доля нелегального рынка снизилась с 25,9% до 8,9%. Внедрение системы маркировки обеспечило прозрачность рынка: теперь можно точно определить количество производителей и импортёров различных изделий. Что способствует устранению барьеров для потребителей при совершении покупок, повышает безопасность товарооборота и способствует росту доверия населения к рыночным механизмам.

- Для потребителей введение маркировки товаров обеспечило защиту от фальсифицированной продукции, потенциально опасной для здоровья, а также предоставило возможность самостоятельно верифицировать надёжность и качество товаров, представленных в розничной торговле. Наблюдается устойчивая тенденция к росту доли выявляемого и блокируемого контрафакта благодаря внедрению системы маркировки. По итогам 2025

года зафиксировано увеличение на 50% числа обращений граждан, связанных с оценкой удобства системы либо выявлением товаров с нарушениями требований маркировки.

- Для предпринимателей и бизнеса в целом система маркировки стала надежным механизмом защиты от контрафакта. Маркировка не только способствовала укреплению доверия со стороны покупателей, но и сохранению деловой репутации компании. Система позволила эффективно выстраивать логистические цепочки, за счет чего снижать издержки и увеличивать прибыль. Увеличение потребительского спроса способствовало повышению конкурентоспособности компаний. С внедрением системы маркировки суммарная дополнительная выручка белых компаний достигла 687 миллиардов рублей, [6].

Российская система маркировки товаров является одной из самых уникальной в мире по сфере охвата, номенклатура маркируемой продукции постоянно расширяется. Наиболее целесообразным, по мнению регулятора системы, будет решение о внедрении маркировки в сектор алкогольной продукции, поскольку на этот сектор приходится наибольшее количество контрафактной и недоброкачественной продукции.

С апреля 2024 года в Российской Федерации действует разрешительный режим на кассах розничных торговых точек: система автоматически блокирует реализацию товаров, не имеющих действительных разрешительных документов либо маркированных некорректно. За период с апреля 2024 по июнь 2025 года благодаря этому механизму предотвращено попадание к потребителям 1,2 млрд. единиц некачественных и нелегальных товаров (рис. 5).

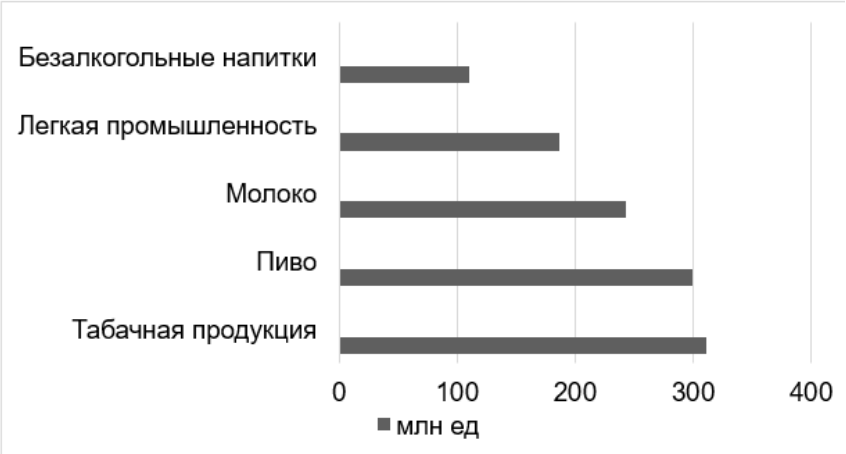


Рис. 5. Объём заблокированной реализации нелегальной продукции по группам товаров (2024–2025)

Ключевой фискальный эффект был получен благодаря маркировке табачной продукции – он оценивается в 245,9 млрд. рублей. За время внедрения системы маркировки в стране было закрыто 45 нелегальных табачных

фабрик, а 18 производств легализовалось. Это создает возможность и тенденцию дальнейшего развития предпринимательства в Российской Федерации, благодаря легальному и защищенному положению производителей.

По словам Министра промышленности и торговли РФ Антона Алиханова, маркировка улучшила условия для честной конкуренции, при этом затраты на неё не превышают 1% от себестоимости продукции, что не сказывается на конечной цене для потребителей [7].

К рискам можно отнести необходимость финансовых и временных вложений со стороны предпринимателей, таких как закупка сканеров, принтеров и оплата идентификационных знаков. Это обусловливает низкую готовность предпринимателей выделять ресурсы на внедрение маркировки.

Кроме того, практика показывает: ключевые ошибки в работе с маркировкой связаны с человеческим фактором. Забыли отправить документ, перепутали цифры в реквизитах, не заметили истечение срока подписи – каждая из этих мелочей стоит денег. Поэтому ЦРПТ в ближайшие годы сделает ставку на автоматизацию – она поможет свести подобные ошибки к минимуму. Улучшение этих механизмов – не просто задача на перспективу, а ключевой элемент стратегии достижения целей. Некоторые специализированные сервисы предлагают готовые решения по автоматизации процессов, в том числе интеграцию с учётной системой и комплексное управление всеми операциями, связанными с маркированными товарами. Это особенно актуально для компаний со средними и большими объемами производства.

Для формирования и поддержания доверия потребителей к системе маркировки необходимо, чтобы государство осуществляло комплексный контроль – как за функционированием самой системы, так и за деятельностью частных сервисов, предоставляющих услуги по автоматизации процессов маркировки.

С учётом изложенного можно заключить, что система маркировки как инструмент противодействия контрафакту уже демонстрирует положительные результаты, но её потенциал ещё не раскрыт полностью. Дальнейшая эффективность будет зависеть от взвешенной оценки рисков и активном использовании возможностей роста, система способна принести существенно больший эффект в будущем.

Таким образом, российская система маркировки товаров уже продемонстрировала свою эффективность. Несмотря на отдельные заявления о трудоемкости и удорожании процессов, внедрённая система продемонстрировала ощутимый эффект в регулировании товарооборота и выявлении контрафактной продукции в Российской Федерации, принося пользу государству, бизнесу и потребителям. В ходе анализа были определены перспективные направления развития системы маркировки, выявлены сопутствующие риски и предложены меры по их снижению.

Список литературы

1. Контрафактный люкс. Объем и динамика российского рынка // URL: https://media.brandmonitor.ru/kontrafaktnyy-lyuks (дата обращения: 29.10.2025).
2. Дмитриева, А. В. Современный рынок контрафактных товаров в РФ / А. В. Дмитриева, А. В. Сальникова // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2019. – № 5–2(33). – С. 355–359. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38532555 (дата обращения: 17.11.2025).
3. Маркировка // URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Маркировка (дата обращения: 10.10.2025).
4. Что такое маркировка товаров // Официальный сайт государственной системы маркировки и прослеживания Честный ЗНАК URL: https://честныйзнак.рф/about-marking/ (дата обращения: 17.10.2025).
5. Национальный каталог товаров // URL: https://национальный-каталог.рф/?ysclid=mi53gwyxqw942928873 (дата обращения: 10.10.2025).
6. Писанкова, В. А. Маркировка товаров: текущее состояние и перспективы развития / В. А. Писанкова, П. В. Хохлова // Развитие таможенного дела Российской Федерации: дальневосточный вектор: сборник научных трудов, Владивосток, 01–29 апреля 2021 года. Том Выпуск 1. – Владивосток: РИО Владивостокского филиала Российской таможенной академии, 2021. – С. 185–188. – DOI 10.24412/cl-36450-2021-1-185-188. – EDN NRTZIR. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46936433 (дата обращения: 17.11.2025).
7. Маркировка товаров принесла в российский бюджет 470 млрд рублей // URL: https://rg.ru/2024/03/22/pod-znakom-pliuьs.html (дата обращения: 10.11.2025).
8. Сотниченко, Е. А. Инновационные методы управления в эпоху цифровой информации / Е. А. Сотниченко, С. В. Бухалин, Д. Д. Канавина // Цифровая трансформация: тенденции и перспективы : II Международная научно-практическая конференция, Москва, 20 декабря 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Мир науки", 2023. – С. 37–45. – EDN NJUAIG. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63893922 (дата обращения: 17.11.2025).
9. Заргарян, М. Т. Возможности применения цифровых технологий в стратегическом планировании и прогнозировании устойчивого развития организаций / М. Т. Заргарян, А. Д. Козлова // Цифровая трансформация: тенденции и перспективы : II Международная научно-практическая конференция, Москва, 20 декабря 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Мир науки", 2023. – С. 136–143. – EDN MJJPSV. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63893935 (дата обращения: 17.11.2025).

Насыров Д.Д.
студент
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
ddnasyrov@edu.hse.ru
Мкртчян Г.А.
студент
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
gamkrtchyan@edu.hse.ru
Мешочков Д.М.
студент
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
dmmeshochkov@edu.hse.ru
Казанов А.М.
студент
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
amkazanov@edu.hse.ru
Ларионов А.
студент
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
alarionov@edu.hse.ru
Королев П.С.
к.т.н., доцент департамента электронной инженерии
НИУ ВШЭ
Россия, Москва
alarionov@edu.hse.ru

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА «ФОРМАТ» ДЛЯ ПРОЦЕССНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО АУДИТА НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Аннотация. В работе рассматривается цифровая платформа «ФОРМАТ», предназначенная для автоматизации процессно-ориентированного аудита надёжности и качества электронных модулей. Актуальность разработки связана с тем, что традиционные справочные методы прогнозирования надёжности преимущественно опираются на параметры элементной базы и условия эксплуатации, но слабо учитывают фактическую зрелость процессов проектирования, производства, контроля и сопровождения изделия. В современных методиках FIDES и 217Plus этот недостаток частично преодолевается за счёт включения процессных факторов в расчёт, однако на практике аудит и инженерные расчёты часто остаются разрозненными процедурами. Предложенная платформа устраняет данный разрыв за счёт единого контура «методика аудита – прохождение оценки – расчёт процессного коэффициента – корректировка показателей надёжности». Методики в системе представлены как настраиваемые шаблоны, на основе которых создаются экземпляры оценки, фиксируются ответы аудитора, выполняются расчётные функции и формируется итоговый результат. Ключевым выходом оценки является коэффициент качества технологического процесса ККТП, используемый как поправочный показатель при

расчёте надёжности и в связанных инженерных процедурах, включая FMEDA. В платформе предусмотрена поддержка типовых методик FIDES, 217Plus и адаптированной методики, ориентированной на российскую практику оценки качества технологических процессов. Показано, что предложенный подход позволяет связать экспертную оценку зрелости СМК с количественными расчётами надёжности и тем самым повысить воспроизводимость, прозрачность и практическую применимость аудита.

Ключевые слова: цифровизация управления качеством, надёжность электронных модулей, онтологический подход, экспертная система, FMEDA, веб-платформа аудита, система менеджмента качества, методика оценки надёжности, FIDES, 217 Plus.

Nasyrov D.D.
Student
HSE University
Russia, Moscow
ddnasyrov@edu.hse.ru
Mkrtchyan G.A.
Student
HSE University
Russia, Moscow
gamkrtchyan@edu.hse.ru
Meshochkov D.M.
Student H
SE University
Russia, Moscow
dmmeshochkov@edu.hse.ru
Kazanov A.M.
Student
HSE University
Russia, Moscow
amkazanov@edu.hse.ru
Larionov A.
Student
HSE University
Russia, Moscow
alarionov@edu.hse.ru
Korolev P.S.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the School of Electronic Engineering
HSE University
Russia, Moscow
p.korolev@hse.ru

DIGITAL PLATFORM «FORMAT» FOR AUDITING RELIABILITY AND QUALITY ASSURANCE PROCESSES: ONTOLOGICAL APPROACH AND SOFTWARE IMPLEMENTATION

Abstract. The paper presents the digital platform FORMAT designed to automate process-oriented auditing of reliability and quality assurance for electronic modules. The relevance of the platform is determined by the limitations of traditional reference-based reliability prediction methods, which mainly rely on component parameters and operating conditions, while

insufficiently reflecting the actual maturity of design, manufacturing, control, and maintenance processes. Modern methodologies such as FIDES and 217Plus partially address this limitation by including process factors in reliability calculations; however, in practical use, audit procedures and engineering calculations often remain disconnected. The proposed platform closes this gap through a unified workflow: audit methodology, assessment run, calculation of a process coefficient, and correction of reliability indicators. In the system, methodologies are represented as configurable templates used to create assessment instances, record auditor responses, execute calculation functions, and generate final results. The key output of an assessment is the technological process quality coefficient KQTP, which is used as a correction factor in reliability calculations and related engineering procedures, including FMEDA. The platform supports standard methodologies such as FIDES and 217Plus, as well as an adapted methodology focused on Russian practice in assessing the quality of technological processes. It is shown that the proposed approach links expert evaluation of quality management system maturity with quantitative reliability calculations and improves the reproducibility, transparency, and practical applicability of audits.

Keywords: digitalization of quality management, reliability of electronic modules, ontological approach, expert system, FMEDA, web-based audit platform, quality management system, reliability assessment methodology, FIDES, 217Plus.

Современные тенденции развития радиоэлектронной аппаратуры характеризуются ростом сложности изделий, увеличением плотности компоновки, расширением функциональных возможностей и усилением требований к надёжности. В таких условиях надёжность электронного модуля всё в меньшей степени определяется только параметрами элементной базы. Существенное влияние начинают оказывать процессы проектирования, производства, входного контроля, испытаний, сопровождения и анализа отказов, то есть весь комплекс процедур, формирующих качество изделия на протяжении его жизненного цикла [1, 2].

Традиционные справочные методы прогнозирования надёжности, основанные на базовых интенсивностях отказов компонентов и наборе поправочных коэффициентов, остаются важной инженерной основой расчёта [3,4]. Однако при применении к современным электронным изделиям они не всегда позволяют учесть фактическое состояние процессов конкретного предприятия. Особенно заметным это ограничение становится в случаях, когда формально одинаковые изделия, изготовленные на разных производственных площадках или при разном уровне технологической дисциплины, демонстрируют различающиеся эксплуатационные показатели.

В международной практике ответом на данную проблему стало развитие процессно-ориентированных подходов к оценке надёжности. Методики FIDES и 217Plus включают в расчёт не только характеристики компонентов и условий эксплуатации, но и результаты аудита процессов, связанных с проектированием, производством, контролем и сопровождением изделия [5, 6]. За счёт этого расчёт надёжности становится ближе к реальной практике обеспечения качества, а итоговые показатели могут корректироваться с учётом зрелости системы менеджмента качества.

Для Отечественной практики данная задача особенно актуальна. С одной стороны, сохраняется потребность в использовании привычных справочных расчётов надёжности и нормативной базы. С другой стороны, возрастает необходимость учитывать реальные процессные факторы: стабильность технологических операций, полноту входного контроля, прослеживаемость решений, качество документации, работу с несоответствиями и обратную связь по отказам. Поэтому перспективным направлением является не отказ от расчётных методик, а их дополнение формализованным аудитом процессов, результаты которого могут быть непосредственно использованы в расчётах [7].

При этом на практике аудит качества и инженерный расчёт надёжности часто существуют как раздельные процедуры. Аудит формирует качественные выводы и рекомендации, а расчёт надёжности выполняется отдельно, с использованием справочных коэффициентов или экспертно заданных поправок. Такой разрыв снижает воспроизводимость оценки и затрудняет обоснование того, каким образом выявленные процессные проблемы влияют на численные показатели надёжности.

На раннем этапе разработки была реализована специализированная версия инструмента, ориентированная на исполнение одной фиксированной методики оценки качества технологических процессов и расчёт коэффициента ККТП (разработанной авторами). Такой подход позволил проверить применимость процессно-ориентированной оценки к задачам прогнозирования надёжности, однако был ограничен рамками заранее заданной структуры методики. Дальнейшее развитие проекта было направлено на устранение этого ограничения и переход от отдельной расчётной методики к универсальной платформе, способной исполнять различные методики аудита и оценки качества.

Целью настоящей работы является представление цифровой платформы «ФОРМАТ», предназначенной для автоматизации процессно-ориентированного аудита надёжности и качества электронных модулей. Платформа построена как универсальная среда исполнения методик оценки: пользователь выбирает методику, создаёт её экземпляр в рамках проекта, проходит оценку, фиксирует ответы и получает рассчитанные показатели. В состав платформы могут быть включены как типовые методики FIDES и 217Plus, так и адаптированная методика, ориентированная на российскую практику оценки качества технологических процессов.

Ключевая идея платформы заключается в замыкании контура «аудит процессов – расчёт надёжности». Результат прохождения методики представляется в виде коэффициента качества технологического процесса ККТП, который отражает уровень зрелости процессов, влияющих на надёжность изделия. Данный коэффициент используется как поправочный показатель при последующих расчётах надёжности и в связанных инженерных процедурах, включая FMEDA и оценку показателей функциональной безопасности в случаях, когда это предусмотрено выбранной методикой [8, 9].

Таким образом, качественная оценка процессов системы менеджмента качества получает количественное выражение и может быть напрямую связана с расчётными моделями надёжности.

Методологической основой платформы является онтологический подход [10]. Вопросы аудита рассматриваются не как простой линейный опросник, а как элементы структурированной модели предметной области. Каждый вопрос связывается с определённым уровнем изделия, стадией жизненного цикла, процессом, организационной областью и категорией влияния на надёжность. Такая структура позволяет не только получить интегральный коэффициент, но и анализировать причины снижения качества в разных разрезах: по этапам жизненного цикла, процессам, подразделениям и группам рисков.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенная платформа переводит методики аудита из формата экспертных чек-листов в цифровую воспроизводимую процедуру. Это позволяет унифицировать проведение оценки, сохранять историю прохождений, автоматически выполнять расчётные функции и формировать результаты, пригодные для дальнейшего инженерного анализа. За счёт этого «ФОРМАТ» может рассматриваться как инструмент цифровизации процессов управления качеством на предприятиях радиоэлектронного профиля.

В основе предлагаемого подхода лежит представление платформы «ФОРМАТ» как универсальной цифровой среды для исполнения формализованных методик аудита, оценки качества и расчёта связанных показателей. В отличие от первоначальной специализированной реализации, ориентированной на одну фиксированную методику, новая версия платформы не ограничивает пользователя заранее заданным набором вопросов, коэффициентов, расчётных формул или видом итогового результата. Методика в системе рассматривается как самостоятельный шаблон, который может быть создан, загружен, изменён и применён в рамках конкретного проекта.

Такой подход позволяет использовать платформу не только для авторской методики расчёта ККТП, но и для других процедур оценки. Предприятие может перенести в систему собственную методику аудита, сохранив принятую терминологию, структуру вопросов, шкалы оценивания, нормативные значения, правила расчёта и форму итоговых результатов. Поэтому «ФОРМАТ» может применяться как для типовых отраслевых методик, таких как FIDES и 217Plus, так и для внутренних корпоративных чек-листов, экспертных анкет, балльных моделей зрелости, матриц соответствия требованиям и иных процедур оценки качества.

В общем виде методика в платформе может включать вопросы аудитора, исходные параметры, расчётные зависимости, нормативные значения, промежуточные показатели, итоговые коэффициенты, правила интерпретации и связи между элементами оценки. При этом результат методики не обязан сводиться к одному коэффициенту. В зависимости от выбранной структуры итогом могут быть интегральная оценка зрелости процессов, набор

частных коэффициентов, рейтинг соответствия требованиям, перечень критических несоответствий, рекомендации по улучшению, поправочный коэффициент для расчёта надёжности или несколько независимых показателей одновременно.

Процесс работы с методикой включает несколько этапов. Сначала создаётся или загружается шаблон методики, определяющий структуру оценки и правила обработки данных. Затем на основе шаблона формируется экземпляр методики для конкретного проекта, изделия, производственной площадки или аудируемого процесса. Далее пользователь проходит оценку: вводит исходные данные, отвечает на вопросы или заполняет иные элементы, предусмотренные методикой. После этого платформа выполняет расчётные зависимости, формирует промежуточные и итоговые показатели, сохраняет результаты и подготавливает данные для отчётности или последующего инженерного анализа.

Принципиальной особенностью платформы является отделение содержания методики от программной реализации. Если в специализированной версии изменение методики требовало изменения логики системы, то в новой версии методика подключается как самостоятельная сущность. Благодаря этому предприятие получает возможность цифровизировать уже существующую процедуру оценки без разработки отдельного программного решения под каждую методику.

В рамках настоящей работы в качестве одного из прикладных вариантов формализации методики рассматривается онтологический подход к оценке факторов, влияющих на надёжность и качество электронных модулей. В этой модели вопросы аудита не являются независимыми пунктами линейного чек-листа. Каждый вопрос связывается с характеристиками предметной области: уровнем рассмотрения изделия, стадией жизненного цикла, типом процесса, подразделением, направленностью влияния и категорией риска. Такая структура позволяет интерпретировать ответы аудитора как признаки состояния конкретных процессов, влияющих на надёжность изделия.

Для авторской методики совокупность факторов представляется в виде дерева агрегации проблем. На нижних уровнях дерева располагаются частные наблюдения, полученные в ходе аудита: например, недостатки входного контроля, неполнота испытаний, отсутствие прослеживаемости изменений, слабая работа с отказами или недостаточная формализация технологических операций. На верхних уровнях дерева отдельные наблюдения группируются по процессам и стадиям жизненного цикла. За счёт этого итоговая оценка не сводится к простой сумме ответов: пользователь может увидеть, какие именно области оказали наибольшее влияние на результат. Например, несколько незначительных замечаний, относящихся к разным вопросам входного контроля, при агрегации могут указывать на общую проблему организации контроля электронной компонентной базы. Аналогично

нарушения в документации, испытаниях и анализе отказов могут быть связаны с более широкой проблемой управления изменениями или обратной связью по эксплуатации.

Предложенная онтологическая схема используется в работе как способ формализации авторской методики оценки качества технологических процессов. При этом она не является обязательной структурой для всех методик, загружаемых в платформу. Пользователь может описать оценку иначе: в виде обычного чек-листа, балльной шкалы зрелости, матрицы соответствия требованиям, экспертной анкеты или собственной иерархии показателей. Иными словами, платформа задаёт не содержание методики, а общий механизм её цифрового исполнения: хранение структуры, прохождение, расчёт показателей и сохранение результата.

Для задач оценки надёжности электронных модулей в авторской методике используется коэффициент качества технологического процесса ККТП. Он отражает влияние организационных и технологических процессов предприятия на надёжность изделия и может использоваться как поправочный коэффициент при инженерных расчётах. По смыслу данный подход близок к процессным коэффициентам, применяемым в FIDES и 217Plus, где результаты оценки процессов также влияют на итоговую интенсивность отказов. Однако в новой версии платформы ККТП рассматривается не как единственно возможный результат, а как один из вариантов выходного показателя методики.

Если выбранная или загруженная методика предусматривает связь с расчётом надёжности, её результаты могут быть переданы в соответствующий расчётный контур платформы. Например, рассчитанный ККТП может использоваться для корректировки справочных интенсивностей отказов и применяться в связанных инженерных процедурах, включая FMEDA. Если же методика предприятия не предполагает инженерных расчётов, платформа может использоваться только как цифровой инструмент аудита, оценки соответствия, накопления истории и формирования отчётности.

В результате работы была сформирована цифровая платформа «ФОРМАТ», объединяющая два направления развития. Первое направление связано с сохранением функциональности первоначальной специализированной версии, ориентированной на процессно-ориентированную оценку качества технологических процессов и расчёт коэффициента ККТП. Второе направление связано с переходом к новой архитектуре, в которой методика перестаёт быть жёстко заданной частью программы и становится самостоятельным настраиваемым шаблоном, доступным для выбора, загрузки и повторного применения.

В первоначальной версии был реализован полный цикл работы с одной фиксированной методикой: создание проекта, прохождение опросника, расчёт итогового коэффициента качества технологических процессов, формирование рекомендаций и визуальный анализ дерева агрегации проблем. Данная версия позволила проверить ключевую идею подхода: экспертные

ответы по процессам жизненного цикла могут быть преобразованы не только в качественное заключение, но и в численный показатель, пригодный для дальнейшего использования в расчётах надёжности. Кроме того, в системе была реализована возможность детализации результата по категориям, что позволяло пользователю видеть не только итоговую оценку, но и проблемные области, повлиявшие на её снижение.

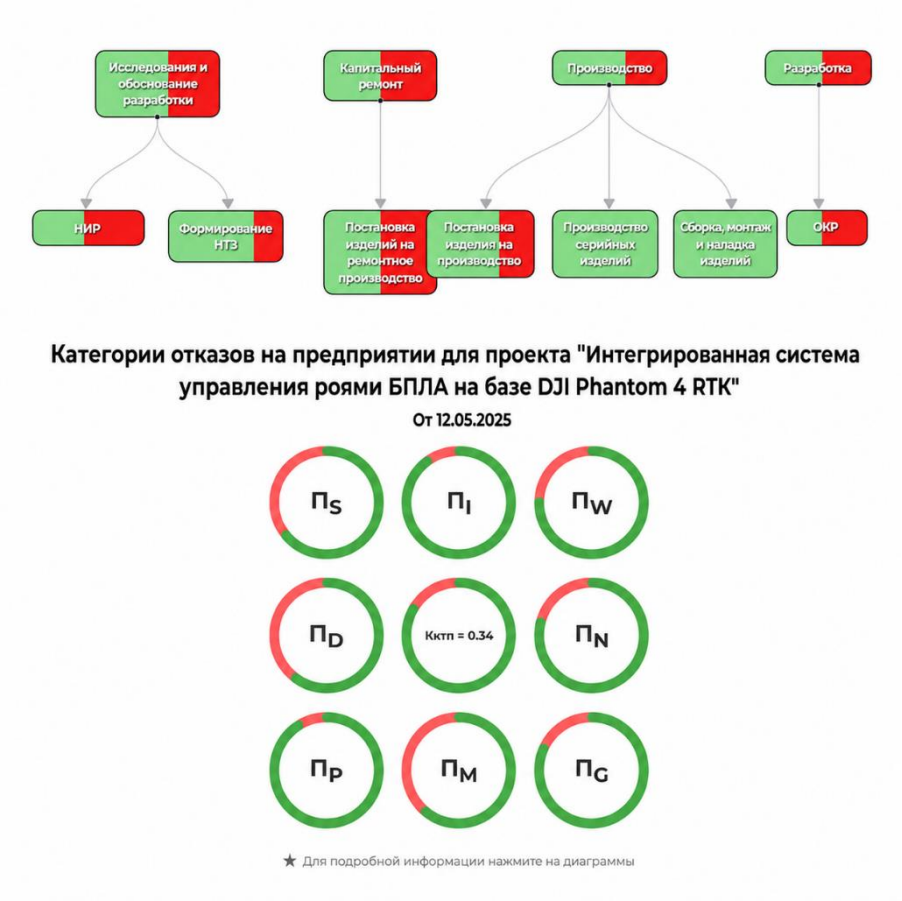


Рис. 1. Пример результатов первой версии программы

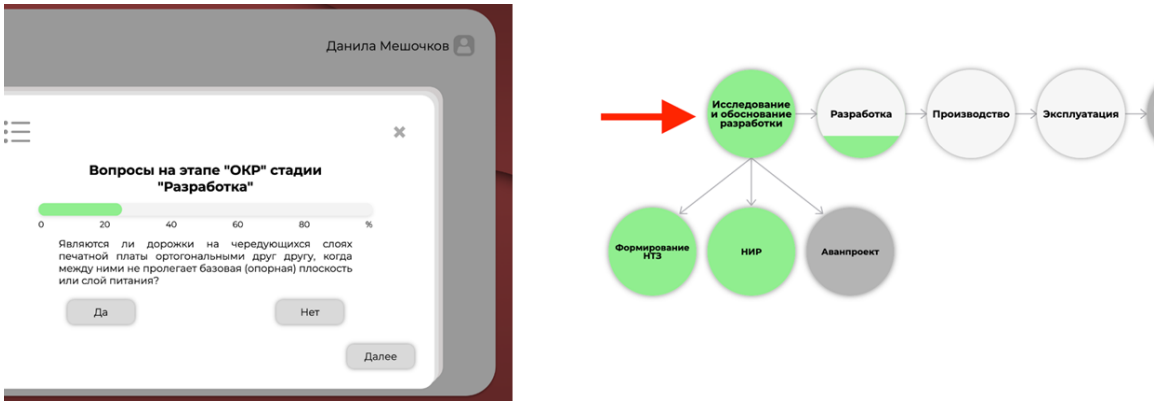


Рис. 2. Пример прохождения опросника первой версии программы

Практическая ценность первоначальной версии заключалась в том, что она показала применимость онтологической модели к задачам аудита каче-

ства. Вопросы методики связывались со стадиями жизненного цикла, категориями влияния, процессами и уровнями рассмотрения изделия. Благодаря этому итоговый результат мог быть разложен на отдельные причины, а пользователь получал возможность перейти от общего коэффициента к конкретным нарушениям и рекомендациям по улучшению. Однако ограничением такой реализации была её привязка к одной методике: изменение структуры оценки или подключение другой методики требовало изменения логики программной системы.

В новой версии платформы данное ограничение было устранено за счёт введения каталога методик. Методика стала рассматриваться как отдельная сущность, которую можно выбрать из каталога, использовать в проекте или дополнить собственной процедурой оценки. В интерфейсе платформы предусмотрены разделы для работы с проектами, каталогом методик, прохождениями, расчётами надёжности и FMEDA. Таким образом, пользователь работает не с единственным опросником, а с набором методик, каждая из которых может иметь собственную структуру входных данных, расчётных функций и итоговых показателей.

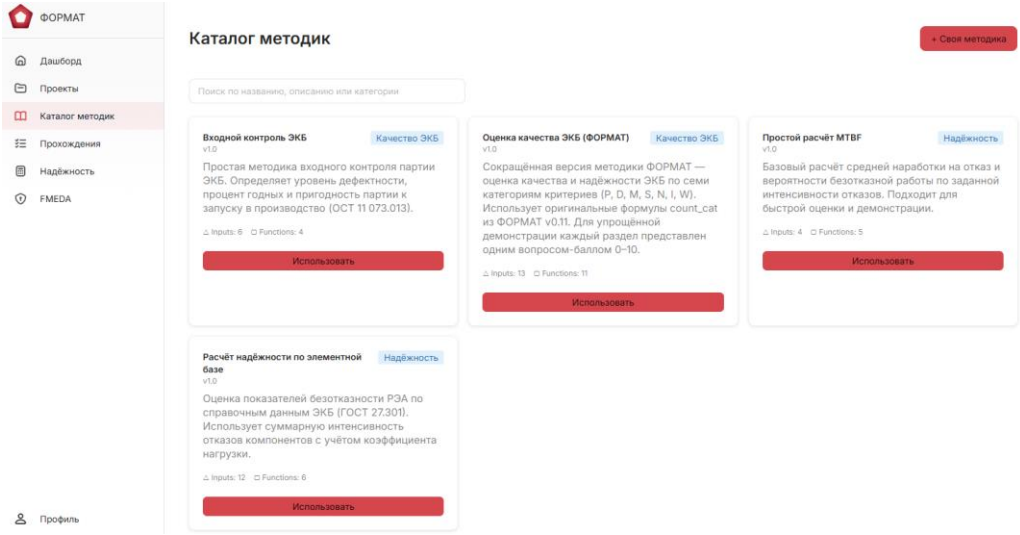


Рис. 3. Каталог методик в новой версии платформы «ФОРМАТ»

Каталог методик стал центральным элементом новой версии платформы. Через него пользователь выбирает готовую методику или добавляет собственную. В демонстрационной версии в каталоге представлены разные по назначению процедуры: входной контроль электронной компонентной базы, оценка качества и надёжности электронных модулей, простой расчёт средней наработки на отказ и расчёт надёжности по элементной базе. Такой набор показывает, что система не привязана к одному типу оценки. В одном случае методика может быть аудиторским опросником, в другом – расчётной формой, в третьем – комбинированной процедурой с вопросами, параметрами и вычисляемыми показателями.

Возможность добавления собственной методики является одним из основных отличий новой версии. Предприятие может перенести в платформу уже используемую процедуру оценки, не меняя её содержательную часть: структуру вопросов, шкалы, критерии, формулы и формат итогового результата. Для пользователя это означает, что цифровизация методики не требует разработки отдельного программного решения под каждый новый регламент. Достаточно описать методику как шаблон и затем применять её в проектах.

Отдельно в платформе введена сущность проекта. Проект выступает как рабочая область, в которой собираются оценки, относящиеся к одному изделию, направлению, производственной площадке или аудируемому процессу. Внутри проекта можно создавать прохождения разных методик и сохранять их результаты. Такой подход удобен для повторных аудитов: предприятие может сравнивать оценки за разные периоды, видеть динамику изменений и отслеживать, какие проблемы были устранены, а какие сохраняются.

Новая версия также сохраняет связь между аудитом и инженерными расчётами. Если выбранная методика формирует поправочный коэффициент, например ККТП, этот результат может использоваться в расчётной части платформы. Для этого предусмотрены отдельные разделы, связанные с расчётом показателей надёжности и FMEDA-анализом. Эти разделы не рассматриваются как самостоятельная цель работы, а служат прикладным продолжением аудита: результат оценки процессов может быть использован не только в отчёте, но и в количественной модели надёжности.

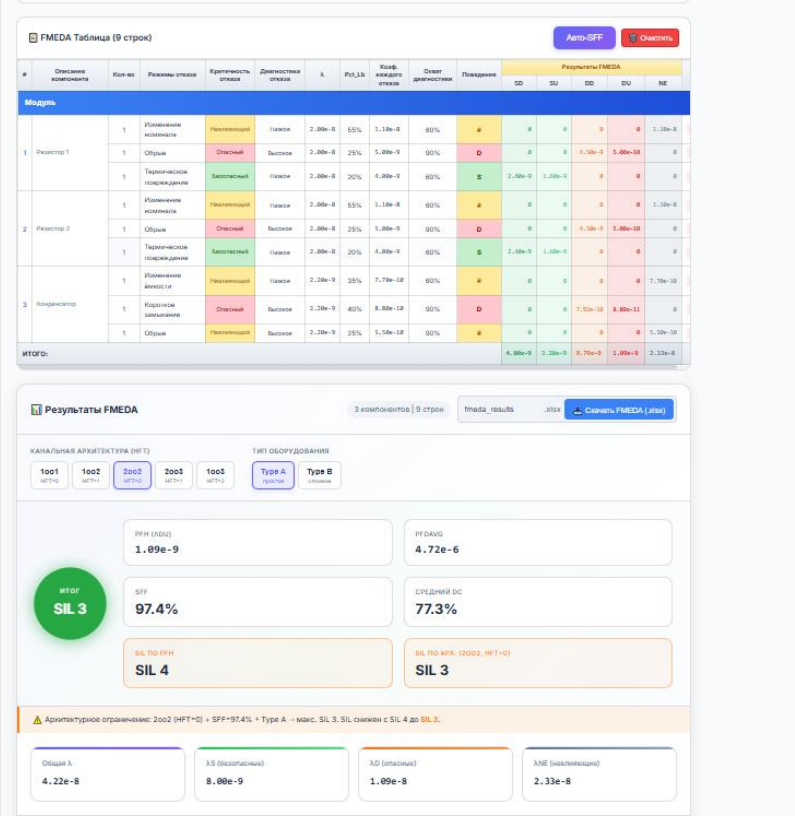


Рис. 4. Пример расчетной части программы

В расчётной части реализована работа с базой компонентов. Для элементов электронной аппаратуры могут задаваться интенсивность отказов, срок службы, срок сохраняемости, группа компонента и дополнительные параметры. Пользователь формирует состав электронного модуля, указывает количество элементов и получает расчётные показатели. Эти данные могут применяться как в расчёте надёжности, так и при формировании FMEDA-таблиц. При необходимости результаты аудита, например значение ККТП, используются как корректирующий параметр расчётной модели.

Итогом работы стало развитие специализированного инструмента оценки ККТП в более гибкую платформу исполнения методик. Первоначальная версия сохранила значение как пример онтологической методики, ориентированной на оценку качества технологических процессов. Новая версия расширила эту идею: теперь «ФОРМАТ» может работать с разными методиками, включая внутренние процедуры предприятия. За счёт этого платформа может применяться не только для расчёта одного коэффициента, но и для цифровизации аудита, оценки качества, накопления истории прохождений и последующего использования результатов в инженерных расчётах надёжности.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2015.
2. ГОСТ Р 27.102–2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2021.
3. ГОСТ Р 27.301–2011. Надёжность в технике. Управление надёжностью. Техника анализа безотказности. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2012.
4. MIL-HDBK-217F. Reliability Prediction of Electronic Equipment. Notice 2. – Washington : Department of Defense, 1995.
5. FIDES Group. FIDES Guide 2022 Edition A : Reliability Methodology for Electronic Systems. – 2023.
6. Quanterion Solutions Incorporated. HDBK-217Plus™ : 2015, Notice 1. Handbook of 217Plus Reliability Prediction Models. – Utica : Quanterion Solutions Incorporated, 2015.
7. ГОСТ Р ИСО 19011–2021. Оценка соответствия. Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021.
8. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). – Geneva : International Electrotechnical Commission, 2018.
9. ГОСТ Р МЭК 61508-1–2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования. – Москва : Стандартинформ, 2013.
10. Gruber T. R. A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5, № 2. – P. 199–220,

Учкин Д. Р.
студент
Университет «Синергия»
Россия, Москва
lilgxn@yandex.ru

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК С СИМУЛЯЦИЕЙ МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ OPENSTREETMAP

Аннотация. Статья посвящена созданию мобильной платформы для управления грузоперевозками. Платформа должна давать возможность пользователю быстро и удобно делать заказ, она имеет удобный и приятный интерфейс. Платформа включает в себя серверную часть на NodeJS с использованием фреймворка NestJS и пользовательскую на React Native, отдельное внимание уделено системе симуляции маршрутов с использованием OSRM и PostgreSQL с расширением PostGIS для удобного хранения и обращения к данным в будущем для подробного анализа и изучения моделей для прогнозирования. Особое внимание уделено работе с большими данным. В работе описаны использование различных алгоритмов маршрутизации таким как алгоритм Дейкстры и реализован механизм оценки и выбора оптимального маршрута. Также был проведен анализ существующих решений, которые уже есть на российском и зарубежном рынке, проектирование базы данных и реализация IDEF моделей. Актуальность работы заключается в том, что система подходит под описание big data так как работает с большими массивами данных и имеет потенциал к расширению путем внедрения нейронных сетей для оценивания накопленных данных и прогнозирование маршрутов.

Ключевые слова: логистика, грузоперевозки, мобильное приложение, маршрутизация, алгоритм Дейкстры, PostGIS, OSRM, React Native, NestJS, Big Data, симуляция маршрутов, геопространственные данные, оптимизация доставки, предиктивная аналитика.

Uchkin D.R.
Student
Synergy University
Russia, Moscow
lilgxn@yandex.ru

DIGITAL PLATFORM FOR ORGANIZING CARGO TRANSPORTATION WITH ROUTE SIMULATION BASED ON OpenStreetMap

Abstract. This article focuses on the creation of a mobile platform for cargo transportation management. The platform should enable users to quickly and easily place orders, and it should have a user-friendly and attractive interface. The platform includes a NodeJS server-side component using the NestJS framework and a React Native front-end. Particular attention is paid to a route simulation system using OSRM and PostgreSQL with the PostGIS extension for convenient storage and future data retrieval for detailed analysis and the study of forecasting models. Particular attention is paid to working with big data. The paper describes the use of various routing algorithms, such as Dijkstra's algorithm, and implements a mechanism for evaluating and selecting the optimal route. An analysis of existing solutions already available on the Russian and international markets, database design, and the implementation of IDEF models were also conducted. The relevance of the work lies in the fact that the system fits the

definition of big data, as it works with large data sets and has the potential for expansion by introducing neural networks for evaluating accumulated data and route forecasting.

Keywords: logistics, cargo transportation, mobile application, routing, Dijkstra's algorithm, PostGIS, OSRM, React Native, NestJS, Big Data, route simulation, geospatial data, delivery optimization, predictive analytics.

Современный этап экономики активно проходит через цифровизацию практически во всех сферах, она охватывает отрасли от производства до логистики. Это очень заметно в сфере грузоперевозок, цифровизация играет огромную роль в логистике. Ведь насколько эффективно построена обработка данных зависит не только прибыль, но и скорость доставки и уровень сервиса для клиента. В сфере грузоперевозок стоит вопрос автоматизации процесса проложения маршрутов и обработки большого количества геопространственных данных для точного планирования и улучшение пользовательского опыта.

Существующие на рынке логистические решения, несмотря на свой масштаб, не всегда оптимально подходят для российских условий. К ключевым трудностям относятся: плохие аналитические возможности обработки маршрутов; Недостаток полной автоматизации планирования маршрутов и интеграции с системами симуляции потоков движения; Сверхнасыщенные мобильные интерфейсы. Работа с массивами данных, связанных с маршрутами в режиме реального времени, представляет собой особую сложность, особенно в густонаселенных мегаполисах и при организации доставки по многим адресам. Данная проблема говорит о актуальности разработки новый более гибких и современных платформ, которые не только визуализируют маршрут, но и симулируют поездки с анализом накопленных данных.

Целью работы является создание платформы с реализацией приложения для грузоперевозок и интегрированной системы симуляции и анализа маршрутов. Для достижения поставленной цели необходимо спроектировать архитектуру, реализовать серверную и клиентскую часть, разобрать алгоритмическое обеспечение маршрутизации на основе графовых моделей и реализовать механизмы сбора и хранения больших данных для анализа в будущем.

Для определения требований к системы был проведен сравнительный анализ готовых логистических решений, в числе международных были DHL и Amazon, он дают мощные алгоритмы маршрутизации, но их использование в российских условиях ограничено, так как у них слабая адаптация к местным дорожным сетям.

Среди отечественных платформ были выделены «Яндекс.Перевозки» и «Грузовичкоф». «Яндекс.Перевозки» лидирует в технологичности, приложение имеет удобный интерфейс, но функционал симуляции маршрутов отсутствует.

«Грузовичкоф» имеет простой интерфейс, и аналитические возможности и работа с пространственными данными реализованы минимально.

Разработка велась по принципам микросервесной архитектуры, что дает систему масштабируемой.

Для решения задачи маршрутизации был применен алгоритм Дейкстры. Графовая модель строится на основе данных из OpenStreetMap, которые были обработаны и приведены к формату платформы.

Клиентская часть приложения была реализована как кроссплатформенное мобильное решение с использованием фреймворка React Native благодаря чему можно использовать один и тот же код на TypeScript на двух платформах использовать нативные компоненты с высокой производительностью и интегрировать модули такие как GPS и push-уведомления.

Серверная часть приложения была реализована с использованием фреймворка NestJS, в качестве базы данных был выбран PostgreSQL с использованием ORM Prisma.

Отдельное внимание было уделено проектированию сервиса симуляции маршрутов он был реализован с использованием OpenStreetMap, потому что открытая лицензия позволяет его свободно использовать и модифицировать, также силами сообщества карты постоянно актуализируются и имеют высокое соответствие реальной обстановке. OpenStreetMap предоставляет детализированную информацию о пути так как он включает ограничения по весу и габаритам транспортного средства, что очень важно для построения маршрутов с учетом специфики грузового транспорта. Маршруты, которые получены из OpenStreetMap, проходят обработку и приводятся к внутреннему формату системы, что позволяет использовать эти данные в симуляции.

В ходе работы была разработана система для организации грузоперевозок, которая состоит из трех компонентов: мобильного приложения, серверной части и микросервиса симуляции маршрутов. Архитектура системы была построена как микросервисная, что обеспечило независимость компонентов и возможность их раздельного масштабирования.

Мобильное приложение было реализовано как кроссплатформенное с использованием React Native с единой кодовой базой на TypeScript для iOS и Android. Приложение поддерживает ролевую модель: интерфейс клиента позволяет создавать заказы, отслеживать их статус, а также просматривать историю поездок; интерфейс водителя позволяет получать заказы, видеть и визуализировать маршрут на карте. В приложение интегрированы нативные модули GPS для отслеживания геопозиции.

Система симуляции маршрутов была реализована как отдельный микросервис, который использует данные из OpenStreetMap. Она показала способность строить маршруты для грузового транспорта с учётом всех реальных дорожных ограничений. В ходе тестовых маршрутов система не показывала пути, которые запрещены для грузовиков. Хранение данных о марш-

рутах в PostgreSQL позволило ускорить повторные расчеты, а также использовать их для дальнейшего обучения моделей прогнозирования и проведения аналитики эффективности маршрутов.

В ходе выполнения работы были пройдены следующие этапы: был произведен анализ предметной области, изучены существующие решения и произведено их сравнение, разработана архитектура и спроектировано мобильное приложение.

Разработано программное обеспечение для симуляции маршрутов перевозок на основе использования OSRM, что дало возможность повысить точность маршрутизации с учетом дополнительных факторов. Систем симуляции маршрутов была реализована для обработки большого потока запросов, что позволяет ее масштабировать и дает возможность накопления данных для последующего их использования в методах машинного обучения.

Более того была обоснована возможность будущей интеграции нейросетей для прогнозирования маршрутов, это позволяет открыть потенциал для дальнейших исследований системы.

Таким образом, все задачи выполнены, и поставленная цель достигнута. Разработанная система способна повысить надежность и точность процессов грузоперевозок. Данная работа может быть продолжена на базе использования методов искусственного интеллекта, что позволит увеличить качество ее работы.

Список литературы

1. Кукие К. Майер-Шенбергер В. Big Data. Революция которая изменит то, как мы живем, работаем и думаем – Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2013 – 240 с.
2. Назаров В. П. Архитектура и проектирование программных систем. – Москва : Инфра-М, 2020, – 416 с.
3. Назарова И. А. Нейросетевые технологии и машинное обучение: теория и практика. – СПб.: Питер, 2022. – 368 с.
4. Лекун Я. Как учится машина. Революция в области нейронных сетей и глубокого обучения – Альпина ПРО, 2021 – 423 с.
5. Обе Р. Хсу. Л PostGIS в действии – М.: ДМК Пресс, 2021. – 736 с.
6. Кнут Д. Искусство программирования. Т.1: Основные алгоритмы. – М.: Вильямс, 2022. – 784 с.
7. Бхаргава А. Грокаем алгоритмы 2-е издание – Питер, 2025 – 336 с.
8. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. Э., Ривест Р. Л., Штайн К.Алгоритмы: построение и анализ. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2022. – 1324 с.
9. Благирев А., Хапаева Н. Big data простым языком. – СПб.: Питер, 2022. – 368с.
10. OpenStreetMap.ru : [project] // GitHub : [web platform]. – GitHub, Inc., 2025. – (Openstreetmap-ru). – URL: https://github.com/openstreetmap-ru/OpenStreetMap.ru (дата обращения: 20,03.2026).
11. OpenStreetMap. RU : Заглавная страница // OpenStreetMap Wiki : [веб-проект]. – URL: https://wiki.openstreetmap.org/w/index.php (дата обращения: 20,03.2026).
12. NodeJS: [проект] // GitHub : [веб-проект]. – GitHub, Inc., 2025. – URL: https://github.com/nodejs/node (дата обращения: 01.04.2026).

13. NestJS: [проект] // GitHub : [веб-проект]. – GitHub, Inc., 2025. – URL: https://github.com/nestjs/nest (дата обращения: 03.04.2026).
14. NestJS : Документация [веб-проект]. – URL: https://docs.nestjs.com/ (дата обращения: 03.04.2026).
15. Expo : Документация [веб-проект]. – URL: https://docs.expo.dev/ (дата обращения: 06.04.2026).

Адылина А.П.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
dmitr1eva@mail.ru
Князев Д.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Dimanknyaz@yandex.ru

ЦИФРОВИЗАЦИЯ АУДИТА ВНЕШНИХ ПОСТАВЩИКОВ В ХОЛДИНГОВОЙ СТРУКТУРЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОМПАНИИ

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы организации аудита внешних поставщиков в холдинговой структуре промышленной компании и предложен подход к их решению на основе цифровизации процесса. Актуальность исследования определяется ростом сложности цепочек поставок, необходимостью сокращения сроков принятия решений по поставщикам, повышения прослеживаемости результатов аудита и усиления контроля корректирующих мероприятий. Методология исследования основана на анализе действующего процесса аудита, сравнении традиционного и цифрового подходов, выявлении организационных и информационных разрывов, а также проектировании целевой модели процесса. В результате установлено, что основными ограничениями действующей практики являются разрозненность данных, отсутствие единых критериев инициирования аудитов, слабая связь между результатами проверки и фактическим снижением рисков качества, а также недостаточная прозрачность контроля выполнения корректирующих мероприятий. Предложена целевая модель цифровизированного процесса, включающая единую карточку аудита, рискориентированное планирование, сквозную прослеживаемость жизненного цикла аудита и автоматизированную оценку результативности. Практическая значимость работы состоит в формировании решения, пригодного для применения в крупных производственных объединениях с территориально распределенной структурой управления. Отдельное внимание уделено организационным условиям внедрения, включая стандартизацию ролей участников аудита, унификацию форм документов и использование аналитических показателей для оценки влияния аудита на качество поставок.

Ключевые слова: аудит внешних поставщиков, цифровизация, управление качеством, рискориентированный подход, корректирующие мероприятия, промышленный холдинг, прослеживаемость, информационная система.

Adylina A.P.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
dmitr1eva@mail.ru
Knyazev D.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Dimanknyaz@yandex.ru

DIGITALIZATION OF EXTERNAL SUPPLIER AUDITS IN THE HOLDING STRUCTURE OF AN INDUSTRIAL COMPANY

Abstract. The paper examines the problems of organizing external supplier audits in the holding structure of an industrial company and proposes an approach to solving them through process digitalization. The relevance of the study is determined by the growing complexity of supply chains, the need to reduce decision-making time regarding suppliers, improve the traceability of audit results, and strengthen control over corrective actions. The research methodology is based on the analysis of the current audit process, comparison of traditional and digital approaches, identification of organizational and information gaps, and design of a target process model. The study shows that the main limitations of current practice are fragmented data, the absence of unified criteria for initiating audits, the weak link between audit results and the actual reduction of quality risks, and insufficient transparency in monitoring corrective actions. A target model of a digitalized process is proposed, including a single audit record, risk-based planning, end-to-end traceability of the audit life cycle, and automated assessment of effectiveness. The practical significance of the work lies in the formation of a solution suitable for large industrial groups with a geographically distributed management structure.

Keywords: external supplier audit, digitalization, quality management, risk-based approach, corrective actions, industrial holding, traceability, information system.

В современных условиях устойчивость промышленной компании в значительной степени определяется качеством работы внешних поставщиков. Для предприятий транспортного машиностроения и других сложных отраслей поставщик влияет не только на сроки поставок и себестоимость, но и на безопасность, надежность и эксплуатационные характеристики конечного изделия. По этой причине аудит внешних поставщиков выступает не формальной процедурой контроля, а важным инструментом управления качеством и рисками в цепочке поставок.

Для крупных холдинговых структур проведение аудитов осложняется многоуровневой системой управления, территориальной распределенностью производственных площадок, различиями в локальных практиках проведения проверок и большим объемом данных о качестве поставляемой продукции. При традиционной модели управления аудитами это приводит к росту трудозатрат, дублированию проверок, задержкам при согласовании и низкой сопоставимости результатов между предприятиями группы.

Дополнительной проблемой является то, что в ряде случаев процесс аудита фактически заканчивается выпуском отчета, тогда как сама цель

аудита состоит в снижении вероятности повторного возникновения несоответствий. При отсутствии единой цифровой среды сложно отследить связь между причиной отклонения, корректирующим мероприятием, фактом его реализации и последующим изменением показателей качества поставок.

Цель настоящей статьи состоит в разработке и обосновании подхода к цифровизации аудита внешних поставщиков в холдинговой структуре промышленной компании. Для достижения цели решались следующие задачи: выявление ключевых ограничений действующей модели аудита, формирование целевой цифровой модели процесса, определение требований к информационной поддержке и оценка ожидаемых организационных и экономических эффектов.

Методология исследования построена на сочетании процессного, сравнительного и проектного подходов. На первом этапе был выполнен анализ существующего процесса аудита внешних поставщиков с точки зрения последовательности этапов, состава участников, применяемых документов, схем согласования, формирования доказательной базы и порядка контроля корректирующих мероприятий. На втором этапе проведено сопоставление традиционной и цифровой моделей аудита по критериям управляемости, прослеживаемости, скорости прохождения этапов и возможности аналитической обработки результатов.

В качестве методической базы использованы положения ГОСТ Р ИСО 9001–2015, ГОСТ Р ИСО 19011–2021, ГОСТ Р ИСО 9000–2015 и ISO 22163:2023, а также результаты обследования процесса аудита поставщиков в промышленной холдинговой структуре. Дополнительно применялись методы структурирования требований к процессу, декомпозиции жизненного цикла аудита, анализа причинно-следственных связей и проектирования целевого информационного модуля.

Для построения целевой модели были выделены ключевые этапы жизненного цикла аудита: инициирование, подготовка, проведение, управление корректирующими мероприятиями и оценка результативности (рис.). Для каждого этапа определялись входы, выходы, исполнители, контрольные точки и данные, подлежащие учету в единой информационной системе. Такой подход позволил перейти от описания частных функций к проектированию сквозного управляемого процесса.

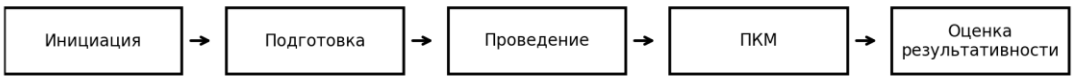


Рис. Целевой жизненный цикл цифровизированного аудита поставщика

В ходе исследования установлено, что ключевым ограничением действующей модели аудита является разрозненность данных (табл. 1). Материалы проверок, планы корректирующих мероприятий, переписка с поставщиком и подтверждающие документы часто размещаются в различных локальных хранилищах и не образуют единой истории взаимодействия. Это затрудняет анализ накопленного опыта, повышает риск потери данных и делает управленческую отчетность зависимой от ручной консолидации информации.

Таблица 1

Ключевые ограничения действующей модели аудита и направления цифровизации

Проблема текущего состояния	Проявление	Последствие для управления качеством	Целевое цифровое решение
Разрозненность данных	Аудиты, ПКМ и переписка ведутся в файлах, почте и локальных реестрах	Низкая прослеживаемость и сложность анализа истории поставщика	Единая карточка аудита и централизованное хранение документов
Не рискориентированное) планирование	Нет единых триггеров запуска и приоритизации проверок	Ресурсы расходуются на аудиты низкой критичности	Формализованные основания аудита и риск-скоринг
Слабый контроль ПКМ	Закрытие мероприятий не всегда подтверждается фактическим эффектом	Сохраняется риск рецидива и повторных проверок	Статусы, сроки, доказательства и оценка результативности в системе
Несопоставимость результатов	Разные площадки используют неоднородные практики фиксации замечаний	Ограничена возможность общей аналитики по группе	Единые шаблоны, шкалы оценок и журнал действий

Второй системный разрыв связан с отсутствием единых критериев инициирования аудита. При недостаточной формализации оснований проверки возрастает вероятность того, что ресурсы аудиторских групп будут направлены на поставщиков с относительно низким уровнем риска, в то время как критичные зоны останутся без своевременного контроля. В результате аудит начинает измеряться по количеству проведенных проверок, а не по влиянию на надежность поставок и снижение повторяемости несоответствий.

Третье существенное ограничение состоит в слабой связке между результатами аудита и фактической оценкой эффективности корректирующих мероприятий. При традиционном подходе завершением процесса часто становится согласование отчета и плана действий, тогда как практическая ценность аудита определяется отсутствием рецидива после внедрения мероприятий. Без цифровой поддержки трудно обеспечить постоянный мониторинг сроков, статусов и доказательств исполнения, а также объективно оценить устойчивость результата.

Еще одной проблемой для холдинговой структуры является дублирование аудиторской деятельности. Один и тот же поставщик может проверяться разными предприятиями группы, однако результаты аудитов не всегда интегрируются в единый контур. Это повышает нагрузку на аудиторов

и представителей поставщика, но не приводит к накоплению общего корпоративного знания.

С учетом выявленных разрывов предложена целевая модель цифровизированного процесса, основанная на следующих принципах: единые правила запуска аудита, сквозная прослеживаемость жизненного цикла, централизованное хранение данных, автоматизированный контроль сроков и переход к оценке процесса по результату. Практически это означает, что решение о проведении аудита должно приниматься на основании совокупности объективных факторов: истории рекламаций, критичности номенклатуры, результатов предыдущих проверок и статуса корректирующих мероприятий.

Базовым объектом учета в целевой модели становится единая карточка аудита, если говорить простыми словами, это «электронное досье», которое сопровождает аудит от момента его планирования до самого конца. В ней фиксируются сведения о поставщике, цели и основания проверки, составе аудиторской группы, программе аудита, критериях оценки, выявленных несоответствиях, доказательной базе, корректирующих мероприятиях, сроках их исполнения и результатах оценки результативности. Это позволяет сформировать цифровой след по каждому делу и исключить разрывы между отдельными этапами процесса.

Особое место в предлагаемой модели занимает автоматизированное управление корректирующими мероприятиями. Каждое несоответствие должно быть связано с конкретной корневой причиной, корректирующим действием, ответственным лицом, сроком выполнения и подтверждающим материалом. Закрытие мероприятий предлагается оценивать не только по факту представления документов, но и по отсутствию повторного проявления аналогичного несоответствия в контролируемый период.

Для холдинговой структуры важным результатом цифровизации становится возможность формирования единого динамического графика аудитов и предотвращения дублирования проверок. Наличие общей истории по поставщику позволяет использовать результаты ранее проведенных аудитов, гибко формировать состав аудиторских групп и принимать решения на основании накопленных данных по всей группе компаний.

Проектируемая информационная поддержка процесса должна включать как минимум следующие функциональные блоки: инициирование и согласование заявки на аудит, подготовка к аудиту и самооценка поставщика, программа аудита, аудит-протокол, управление корректирующими мероприятиями, оценка результативности и аналитическая отчетность. Именно такая архитектура позволяет перейти от частичной автоматизации отдельных документов к цифровому управлению всем жизненным циклом аудита.

Оценка ожидаемого эффекта показала, что цифровизация аудита поставщиков дает не только организационный, но и выраженный экономический результат (табл. 2). Снижение трудоемкости на этапах инициации, пла-

нирования, оформления результатов и контроля корректирующих мероприятий позволяет существенно сократить совокупные трудозатраты на один аудит. Дополнительный эффект обеспечивается за счет уменьшения числа дублирующих выездных проверок и повышения качества управленческих решений при выборе поставщиков для повторного аудита.

Таблица 2

Ожидаемые эффекты внедрения цифровизированного процесса аудита

Показатель	Расчетное значение	Практический эффект
Сокращение времени на инициацию и планирование аудита	до 50%	Ускорение согласования и подготовки проверки
Снижение трудоемкости оформления и контроля ПКМ	до 40–60% по отдельным этапам	Высвобождение ресурсов аудиторской группы
Ожидаемый годовой экономический эффект	4,86 млн руб.	Подтверждение экономической целесообразности проекта
Оценочный срок окупаемости	около 2,1 месяца	Быстрый возврат вложений при достижении целевых параметров

Важно подчеркнуть, что сама по себе автоматизация документооборота не обеспечивает устойчивого результата. Необходимым условием является одновременная стандартизация видов аудита, критериев оценки, правил фиксации несоответствий, маршрутов согласования и принципов оценки результативности. Только при совмещении методологической и цифровой составляющих аудит поставщика становится полноценным инструментом рискориентированного управления качеством.

Проведенное исследование показало, что для холдинговой структуры промышленной компании цифровизация аудита внешних поставщиков должна рассматриваться как трансформация управленческой модели процесса, а не как простой перевод документов в электронный формат. Ключевыми направлениями изменений являются унификация оснований для запуска аудита, формирование единой цифровой карточки дела, обеспечение сквозной прослеживаемости несоответствий и корректирующих мероприятий, а также переход к оценке процесса по фактическому результату.

Практическая ценность предложенного подхода состоит в том, что он позволяет связать воедино этапы инициирования, подготовки, проведения аудита, контроля исполнения корректирующих мероприятий и оценки их результативности. Это повышает прозрачность процесса, уменьшает вероятность дублирования аудитов, сокращает сроки согласования и создает основу для аналитического управления качеством поставок на уровне всей группы компаний.

В качестве дальнейшего развития целесообразно рассматривать интеграцию цифрового контура аудита с системами качества, поставочным и претензионным контуром, а также применение риск-скоринга и предиктив-

ной аналитики для выбора объектов проверки. Такой подход позволит перейти от реакции на уже возникшие проблемы к упреждающему управлению рисками поставщиков.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. Москва: Стандартинформ, 2015.
2. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. Москва: Стандартинформ, 2015.
3. ГОСТ Р ИСО 19011–2021. Оценка соответствия. Руководящие указания по проведению аудита систем менеджмента. Москва: Стандартинформ, 2021.
4. Материалы исследования процесса аудита внешних поставщиков в промышленной холдинговой структуре, использованные в обобщенном и обезличенном виде.
5. Авторские расчеты организационно-экономического эффекта цифровизации процесса аудита поставщиков.

Никонорова А.В.
старший преподаватель Института экономики и менеджмента
Ярославский государственный технический университет
Россия, Ярославль
nikonorovaav@ystu.ru

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В АККРЕДИТОВАННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ: ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные проблемы и перспективы цифровизации процессов менеджмента качества и подтверждения соответствия программного обеспечения (ПО) в аккредитованных испытательных лабораториях (АИЛ). Исследованы ключевые вызовы, связанные с применением действующей нормативной базы в области стандартизации ИТ-объектов на различных стадиях жизненного цикла ПО. Предложен концептуальный подход к построению цифровой системы менеджмента качества (СМК) испытательной лаборатории, ориентированной на интеграцию требований ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025, ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010, ГОСТ Р 58041 и серии стандартов ГОСТ Р 56939. Обоснованы направления автоматизации процедур испытаний, сбора доказательной базы и формирования протоколов испытаний ПО. Результаты исследования могут быть использованы при разработке регламентов деятельности АИЛ, проектировании цифровых платформ контроля качества ПО и совершенствовании механизмов подтверждения соответствия в сфере информационных технологий.

Ключевые слова: менеджмент качества, подтверждение соответствия, программное обеспечение, аккредитованная испытательная лаборатория, жизненный цикл ПО, цифровизация, стандартизация, ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025, испытания ПО, цифровая трансформация.

Nikonorova A.V.
Senior Lecturer of the Institute of Economics and Management
Yaroslavl State Technical University
Russia, Yaroslavl
nikonorovaav@ystu.ru

DIGITALIZATION OF QUALITY MANAGEMENT AND SOFTWARE CONFORMITY ASSESSMENT PROCESSES IN ACCREDITED TESTING LABORATORIES: CHALLENGES AND PROSPECTS

Abstract. The article examines current challenges and prospects for digitalization of quality management and conformity assessment processes for software in accredited testing laboratories (ATL). Key challenges associated with applying existing regulatory frameworks in the field of IT standardization at various software life cycle stages are investigated. A conceptual approach to building a digital quality management system for a testing laboratory focused on integrating requirements of GOST R ISO/IEC 17025, GOST R ISO/IEC 25010, GOST R 58041, and the GOST R 56939 series of standards is proposed. Directions for automating testing procedures, collecting evidence bases, and generating software test reports are substantiated. The research results can be used in developing regulations for ATL activities, designing digital software quality control platforms, and improving conformity assessment mechanisms in the information technology sector.

Keywords: quality management, conformity assessment, software, accredited testing laboratory, software life cycle, digitalization, standardization, GOST R ISO/IEC 17025, software testing, digital transformation.

Стремительное развитие информационных технологий, рост числа программных продуктов, используемых в критически важных системах, а также расширение международного сотрудничества в сфере оценки соответствия обусловливают необходимость формирования научно-практических основ стандартизации и менеджмента качества программного обеспечения. Особую значимость приобретают вопросы обеспечения достоверности, воспроизводимости и прослеживаемости результатов испытаний ПО в аккредитованных испытательных лабораториях, функционирующих в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов.

Переход к цифровой экономике и масштабная цифровизация государственного управления формируют устойчивый спрос на надёжные инструменты подтверждения соответствия ПО установленным требованиям [1]. При этом действующая нормативная база в области испытаний и оценки качества ПО зачастую не в полной мере адаптирована к реалиям динамично изменяющегося ИТ-ландшафта, характеризующегося применением гибких методологий разработки, контейнеризации, микросервисных архитектур и облачных решений.

В условиях цифровой трансформации перед аккредитованными испытательными лабораториями встаёт комплекс принципиально новых задач: автоматизация процессов испытаний, управление цифровыми доказательствами, обеспечение юридической значимости электронных протоколов,

интеграция систем менеджмента качества с автоматизированными инструментами тестирования. Решение данных задач требует не только технологических, но и методологических и нормативно-правовых инноваций [2].

Целью настоящей работы является анализ ключевых вызовов и перспектив цифровизации процессов менеджмента качества и подтверждения соответствия ПО в АИЛ, а также разработка концептуального подхода к построению цифровой системы менеджмента качества испытательной лаборатории.

Нормативная база и актуальные проблемы стандартизации по в аил

Деятельность аккредитованных испытательных лабораторий в области ИТ регулируется обширным массивом национальных и международных стандартов. Ключевым документом, устанавливающим требования к компетентности, беспристрастности и результативной работе лабораторий, является ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2019 [3]. Данный стандарт охватывает требования к системе менеджмента, техническим компетенциям, процессам и ресурсам, однако в минимальной степени затрагивает специфику испытания программных продуктов.

Характеристики качества ПО определяются в соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015 (SQuaRE), устанавливающим иерархическую модель качества продукта и качества при использовании [4]. Вопросы разработки доверенного ПО регламентируются ГОСТ Р 56939–2024 и ГОСТ Р 58041–2017, а требования к процессам жизненного цикла – серией стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207 [5]. При этом следует констатировать, что интеграция указанных стандартов в единую методологию испытаний АИЛ остаётся недостаточно разработанной.

К числу актуальных проблем в данной предметной области относятся:

- отсутствие единых методических документов, регламентирующих порядок проведения испытаний ПО в АИЛ с учётом стадий жизненного цикла;
- неопределённость критериев оценки метрологической прослеживаемости результатов программных испытаний;
- разрыв между темпами обновления нормативной базы и скоростью развития технологий разработки ПО;
- недостаточная формализованность процедур верификации автоматизированных результатов тестирования;
- сложность обеспечения юридической значимости электронных протоколов испытаний в условиях многосторонних схем подтверждения соответствия.

Цифровизация как инструмент трансформации системы менеджмента качества АИЛ

Цифровизация системы менеджмента качества АИЛ предполагает комплексную трансформацию организационных, технических и документальных процессов лаборатории на основе цифровых технологий. В отличие от простой автоматизации, цифровая трансформация СМК затрагивает логику

формирования доказательной базы, способы валидации результатов испытаний и механизмы обеспечения беспристрастности [6].

Ключевые направления цифровизации СМК АИЛ

На основе анализа международных тенденций и требований стандартов можно выделить следующие магистральные направления цифровизации процессов менеджмента качества в АИЛ:

- автоматизация процессов испытаний ПО. Внедрение CI/CD-интегрированных испытательных стендов, средств автоматической генерации тест-кейсов на основе требований и автоматизированного сбора артефактов испытаний;

- управление жизненным циклом документации СМК. Применение систем электронного документооборота (СЭД) с поддержкой версионирования, управления изменениями, контроля актуальности стандартов;

- цифровое управление несоответствиями и корректирующими действиями (CAPA). Внедрение специализированных информационных систем с аналитическими модулями для анализа первопричин и мониторинга эффективности корректирующих мер;

- электронные протоколы испытаний с применением усиленной квалифицированной электронной подписи. Обеспечение юридической значимости и неизменности результатов испытаний;

- прослеживаемость цепочки хранения объектов испытания (chain of custody). Применение технологий blockchain-реестра или защищённых журналов аудита для фиксации обращения с образцами ПО.

Концептуальная модель цифровой СМК АИЛ

Концептуальная модель цифровой СМК АИЛ может быть представлена в виде трёхуровневой архитектуры, соответствующей логике стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 (табл.).

Таблица

Концептуальная модель цифровой СМК АИЛ

Уровень	Компоненты	Связанные стандарты
Стратегический (управление)	Политика качества, цели, внутренний аудит, анализ со стороны руководства, управление рисками	ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025, ГОСТ Р ИСО 9001
Операционный (испытания)	Планирование испытаний, выбор методов, валидация методов, оценка неопределённости, управление объектами испытания	ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010, ГОСТ Р 58041, ГОСТ Р 56939
Инфраструктурный (ресурсы)	Средства испытаний ПО, испытательные среды, ПО СМК, LIMS, метрологическое обеспечение	ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207, ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025

Стадии жизненного цикла по как объект стандартизации и управления качеством

Проблема управления качеством ПО неразрывно связана с концепцией жизненного цикла программного продукта. В соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010 жизненный цикл ПО включает процессы соглашения, организационного обеспечения, технические процессы и процессы поддержки. С точки зрения АИЛ, наибольший интерес представляют стадии разработки (верификация и валидация), квалификационного тестирования и приёмки, а также поддержки и сопровождения.

Особенностью программного обеспечения как объекта испытаний является его нематериальная природа, что порождает ряд методологических сложностей [7]:

- невозможность физического разрушения или деградации объекта испытания в процессе испытаний;
- высокая зависимость результатов испытаний от конфигурации испытательной среды;
- сложность воспроизведения дефектов, проявляющихся недетерминировано или в зависимости от состояния системы;
- необходимость учёта обновлений (патчей) и инкрементных изменений при повторных испытаниях.

Цифровизация процессов АИЛ позволяет преодолеть ряд указанных ограничений посредством применения контейнеризированных испытательных сред (Docker, Kubernetes), инфраструктуры как кода (IaC), систем управления конфигурациями и средств автоматической регистрации состояния испытательной среды. Это обеспечивает воспроизводимость и прослеживаемость испытаний, что является базовым требованием ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025.

Несмотря на очевидные преимущества, цифровизация СМК АИЛ сопряжена с рядом системных вызовов, требующих комплексного решения:

Нормативно-правовые вызовы

Действующая редакция ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2019 содержит принципиально технологически нейтральные требования, что, с одной стороны, обеспечивает их долгосрочную применимость, а с другой – создаёт сложности при интерпретации применительно к автоматизированным испытаниям. В частности, не определены:

требования к валидации программных средств испытаний в условиях CI/CD;

порядок подтверждения беспристрастности при использовании автоматизированных испытательных платформ;

критерии признания цифровых доказательств как эквивалентных физически верифицированным результатам.

Технические и методологические вызовы

Применение современных технологий разработки ПО, включая DevSecOps, генеративный ИИ-ассистированный код и Low-code/No-code платформы, существенно изменяет характер объектов испытаний. АИЛ должны развивать компетенции в области:

испытания ПО, разработанного с применением методов машинного обучения;

оценки безопасности и надёжности компонентов с открытым исходным кодом (OSS);

анализа зависимостей программных продуктов и управления цепочкой поставок ПО (SBOM).

Кадровые и организационные вызовы

Цифровая трансформация СМК АИЛ требует формирования принципиально нового профиля компетенций специалистов лаборатории, сочетающего экспертизу в области стандартизации, менеджмента качества и современных технологий тестирования ПО. Согласно результатам отраслевых опросов, дефицит специалистов требуемой квалификации является одним из главных сдерживающих факторов цифровизации испытательных лабораторий [8].

Перспективы и направления развития

С учётом выявленных вызовов можно обозначить следующие перспективные направления развития цифровых СМК аккредитованных испытательных лабораторий в области ПО:

1. Разработка национальных методических рекомендаций (МР) по применению ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 при проведении автоматизированных испытаний ПО, учитывающих специфику современных технологий разработки и развёртывания программных продуктов.

2. Создание типовых моделей системы менеджмента качества АИЛ, ориентированных на различные категории объектов испытаний (встраиваемое ПО, веб-приложения, ПО КИИ, ПО с применением ИИ) и оснащённых параметризуемыми шаблонами программ и методик испытаний.

3. Формирование требований к лабораторным информационным управляющим системам (LIMS) для испытаний ПО, учитывающих специфику управления цифровыми объектами испытания, артефактами тестирования и доказательной базой.

4. Разработка механизмов взаимного признания результатов испытаний, проведённых с применением автоматизированных средств, в рамках многосторонних соглашений о признании (MLA/MRA), в том числе в контексте ILAC и EA.

5. Внедрение принципов рискориентированного подхода к планированию испытаний ПО, предусматривающего дифференцированный объём и состав испытательных процедур в зависимости от критичности и классификации ПО.

Реализация указанных направлений потребует координированных усилий со стороны регуляторов (Росстандарт, Росаккредитация, ФСТЭК России, ФСБ России), разработчиков стандартов (технические комитеты ТК 22, ТК 362, ТК 431), научного сообщества и испытательных лабораторий.

Цифровизация процессов менеджмента качества и подтверждения соответствия программного обеспечения в аккредитованных испытательных

лабораториях представляет собой объективно необходимый и закономерный процесс, детерминированный как технологическим прогрессом, так и усложнением требований к качеству и безопасности ПО.

В ходе проведённого исследования установлено, что ключевыми вызовами данного процесса являются: неполнота нормативно-правовой базы применительно к автоматизированным испытаниям, разрыв между темпами технологического развития и скоростью обновления стандартов, а также дефицит компетенций в области цифрового менеджмента качества ПО.

Предложенная концептуальная трёхуровневая модель цифровой СМК АИЛ, основанная на интеграции требований ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025, ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010, ГОСТ Р 56939 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207, обеспечивает системный подход к трансформации деятельности испытательной лаборатории и может служить методологической основой для разработки конкретных регламентов и технических решений.

Дальнейшее развитие исследования предусматривает апробацию предложенного подхода на базе действующих АИЛ, разработку методики оценки зрелости цифровой СМК и формирование программно-методического комплекса поддержки испытательной деятельности.

Список литературы

1. Алексеев А. Н., Кудрявцев В. Б. Цифровая трансформация систем менеджмента качества: методологические аспекты // Стандарты и качество. – 2023. – № 4. – С. 24–31.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. – М.: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества системы и программного продукта. – М.: Стандартинформ, 2016. – 36 с.
4. ГОСТ Р 56939–2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. – М.: Росстандарт, 2024.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010, Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. – М.: Стандартинформ, 2012. – 104 с.
6. Петров М. В., Захарова Т. И. Автоматизация испытательной деятельности в условиях цифровой трансформации // Вопросы стандартизации. – 2024. – № 2. – С. 18–26.
7. Myers G. J., Sandler C., Badgett T. The Art of Software Testing. – 3rd ed. – Wiley, 2011. – 240 p.
8. Отчёт ILAC об автоматизации испытательных лабораторий [Электронный ресурс]. – URL: https://ilac.org (дата обращения: 15.01.2025).

Кочукова А.Б.
студент
Тульский филиал РЭУ им. Г.В. Плеханова
Россия, Тула
ko4ukova.a2006@yandex.ru

ЦИФРОВИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ АКТИВОВ И ПАССИВОВ КОММЕРЧЕСКИХ БАНКОВ В УСЛОВИЯХ ВОЛАТИЛЬНОСТИ КЛЮЧЕВОЙ СТАВКИ (2022–2025)

Аннотация. Период 2022–2025 гг. характеризуется экстремальной волатильностью ключевой ставки Банка России, что создаёт серьёзные вызовы для систем менеджмента качества в коммерческих банках. В статье рассматривается роль цифровизации в управлении качеством активов и пассивов, а также в обеспечении устойчивости банковского сектора. На основе данных Банка России выявлена сильная обратная корреляция между ключевой ставкой и рентабельностью активов (ROA) с коэффициентом -0,78. Показано, что цифровые инструменты (автоматизированный риск-менеджмент, стресс-тестирование, скоринговые модели, дашборды качества) позволяют банкам адаптироваться к шокам процентной ставки, перераспределяя кредитные портфели и управляя структурой пассивов. Выявлены основные цифровые вызовы: качество данных, скорость реакции систем и интеграция с регуляторными требованиями.

Ключевые слова: цифровизация, управление качеством, ключевая ставка, рентабельность активов, качество активов, качество пассивов, банковский менеджмент, волатильность, стресс-тестирование, риск-менеджмент.

Kochukova A.B.
Student
Tula branch of Plekhanov Russian University of Economics
Russia, Tula
ko4ukova.a2006@yandex.ru

DIGITALIZATION OF ASSET AND LIABILITY MANAGEMENT IN COMMERCIAL BANKS UNDER KEY RATE VOLATILITY (2022–2025)

Annotation. The period 2022–2025 is characterized by extreme volatility of the Bank of Russia key rate, which creates serious challenges for quality management systems in commercial banks. The article examines the role of digitalization in managing the quality of assets and liabilities, as well as in ensuring the stability of the banking sector. Based on the data of the Bank of Russia, a strong negative correlation between the key rate and return on assets (ROA) with a coefficient of -0.78 is revealed. It is shown that digital tools (automated risk management, stress testing, scoring models, quality dashboards) allow banks to adapt to interest rate shocks by redistributing loan portfolios and managing the structure of liabilities. The main digital challenges are identified: data quality, system response speed and integration with regulatory requirements.

Keywords: digitalization, quality management, key rate, return on assets, asset quality, liability quality, banking management, volatility, stress testing, risk management.

В рамках цифровизации процессов управления качеством в коммерческих банках ключевым вызовом становится оперативное управление качеством активов и пассивов в условиях макроэкономической нестабильности. Как отмечают Азизова А.Ф. и Аюпов А.А., цифровизация становится ключевым фактором финансовой состоятельности коммерческих банков [1, с. 33–34]. Ключевая ставка Банка России, являясь основным инструментом денежно-кредитной политики, напрямую влияет на стоимость фондирования и доходность размещения средств. Период 2022–2025 гг. уникален тем, что ставка совершала экстремальные колебания: от экстренного повышения до 20% в феврале 2022 года до снижения до 7,5% и последующего нового роста до 21% в 2024–2025 годах [5]. Для коммерческих банков такие изменения создают серьёзные вызовы, особенно в части качества управления активами и пассивами [3, с. 40–42]. Цифровизация процессов управления качеством в данном контексте выступает не просто конкурентным преимуществом, а необходимым условием устойчивости. Цель данного исследования – оценить влияние динамики ключевой ставки на рентабельность активов (ROA) как интегральный показатель качества банковского управления, а также выявить цифровые инструменты, позволяющие банкам адаптироваться к процентным шокам и сохранять качество активов и пассивов.

Исследование базируется на официальных поквартальных данных Банка России за период с 1 января 2022 года по 1 января 2026 года [4, 5, 7], аналитических обзорах рейтингового агентства «Эксперт РА» [9], публикациях деловой прессы [8] и научных работах, посвящённых цифровизации банковского сектора [1, 2, 3]. Для оценки взаимосвязи между ключевой ставкой и рентабельностью активов использовался корреляционный анализ Пирсона, в том числе с временным лагом в один квартал, поскольку реакция банковской отчётности на изменение ставки не является мгновенной. Кроме того, был проведён структурный анализ активов и пассивов крупнейших российских банков в периоды минимальной (7,5%, июль 2023) и максимальной (21%, январь 2025) ключевой ставки. Это позволило выделить адаптационные механизмы, в том числе те, которые реализуются с помощью цифровых инструментов управления качеством.

Динамика ключевой ставки и показателей качества управления

Для анализа влияния ключевой ставки на рентабельность активов (ROA) и чистую процентную маржу (ЧПМ) была составлена таблица 1, отражающая поквартальную динамику этих показателей [5, 7, 9]. Хорошо видно, что резкий рост ключевой ставки до 20% в первом квартале 2022 года не привёл к немедленному падению ROA – это свидетельствует о наличии временного лага, обусловленного инерционностью банковских балансов. В 2023 году, когда ставка длительное время находилась на уровне 7,5%, рентабельность активов достигла максимального значения 2,5% (на 01.01.2023). Однако с середины 2023 года начинается цикл повышения ставки, и ROA демонстрирует устойчивое снижение вплоть до 1,6% на начало 2025 года. При этом чистая процентная маржа ведёт себя иначе: она

растёт вслед за повышением ключевой ставки, достигая пика 4,8% в начале 2025 года. Это говорит о том, что банки в целом успешно перекладывают рост стоимости фондирования на заёмщиков, однако одновременно растут отчисления в резервы на возможные потери, что и сдерживает рост чистой прибыли и ROA [9]. Как подчёркивает Маннанова А.Р., цифровые технологии позволяют банкам более точно оценивать кредитные риски в условиях волатильности [2, с. 35].

Таблица 1

Динамика ключевой ставки и рентабельности активов банковского сектора РФ в 2022–2025 гг.

Дата	Ключевая ставка ЦБ РФ,%	Рентабельность активов (ROA),%	Чистая процентная маржа (ЧПМ),%
01.01.2022	8,50	2,2	4,1
01.04.2022	20,00	2,0	4,5
01.07.2022	11,00	2,1	4,3
01.10.2022	7,50	1,9	3,9
01.01.2023	7,50	2,5	4,2
01.04.2023	7,50	2,4	4,1
01.07.2023	7,50	2,3	4,0
01.10.2023	13,00	2,1	4,2
01.01.2024	16,00	2,0	4,4
01.04.2024	16,00	1,9	4,5
01.07.2024	16,00	1,8	4,6
01.10.2024	19,00	1,7	4,7
01.01.2025	21,00	1,6	4,8
01.04.2025	20,00	1,7	4,7
01.07.2025	18,00	1,9	4,5
01.10.2025	17,00	2,0	4,4
01.01.2026	17,00	2,1	4,3

Для наглядного представления взаимосвязи на рисунке 1 представлена совмещённая динамика ключевой ставки и ROA, на рисунке 2 – ключевой ставки и ЧПМ, а на рисунке 3 – сравнительная динамика ROA и ЧПМ. Как видно из рисунка 1, повышение ключевой ставки сопровождается снижением рентабельности активов, но с заметным запаздыванием.

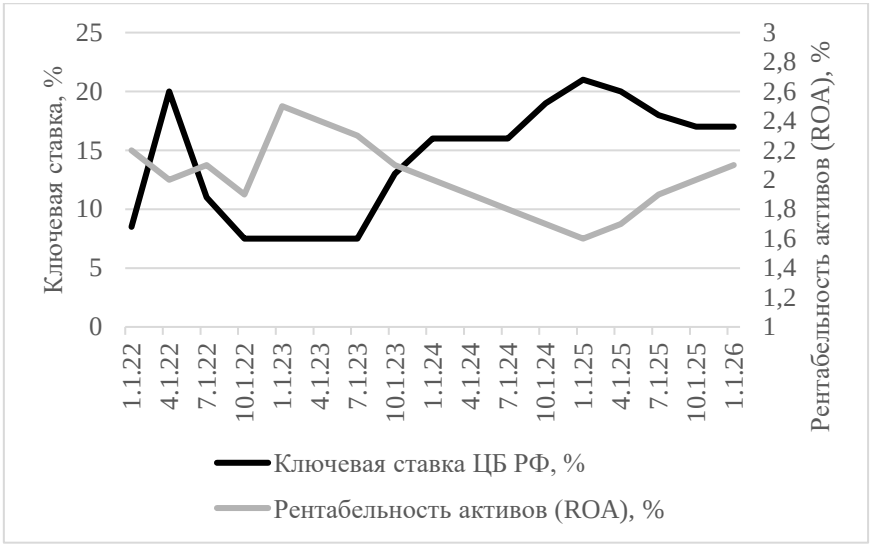


Рис. 1. Совмещённая динамика ключевой ставки и рентабельности активов (ROA) банковского сектора РФ в 2022–2025 гг.

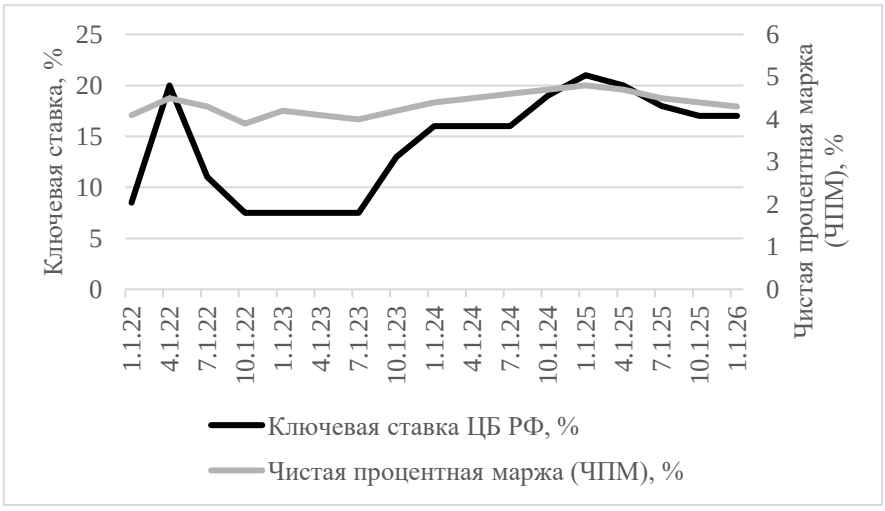


Рис. 2. Совмещённая динамика ключевой ставки и чистой процентной маржи (ЧПМ) банковского сектора РФ в 2022–2025 гг.

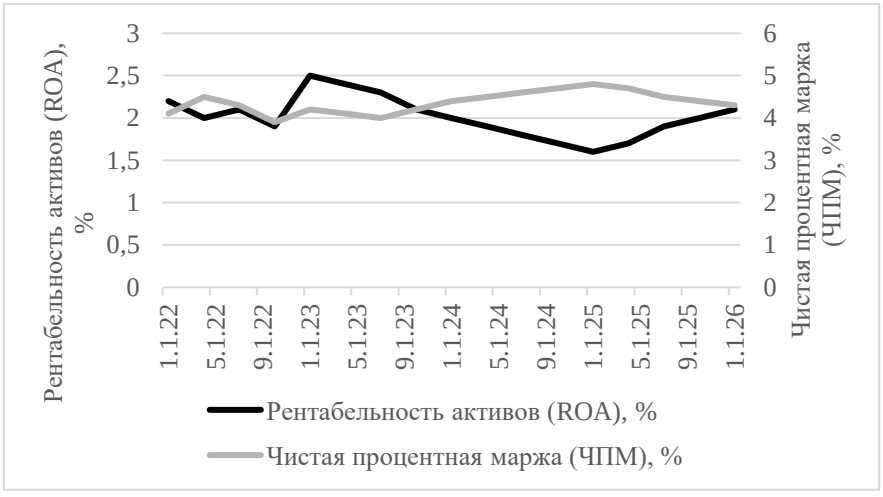


Рис. 3. Сравнительная динамика рентабельности активов (ROA) и чистой процентной маржи (ЧПМ) банковского сектора РФ в 2022–2025 гг.

Для количественной оценки взаимосвязи был проведён корреляционный анализ. Наиболее высокая зависимость зафиксирована при сопоставлении ключевой ставки с показателями ROA следующего квартала: коэффициент корреляции Пирсона составил –0,78, что подтверждает наличие сильной обратной связи [5, 7, 9]. Иными словами, рост ключевой ставки через один квартал приводит к снижению рентабельности активов, и наоборот. Этот факт имеет прямое значение для цифровых систем управления качеством: они должны прогнозировать изменение ROA с упреждением в один квартал и заранее корректировать структуру активов и пассивов. Азизова А.Ф. и Аюпов А.А. отмечают, что именно цифровизация позволяет банкам оперативно реагировать на изменения внешней среды [1, с. 36].

Адаптационные механизмы и роль цифровизации

Для понимания того, как банки адаптируются к изменению ключевой ставки, было рассмотрено изменение структуры их активов и пассивов в периоды минимальной (июль 2023, 7,5%) и максимальной (январь 2025, 21%) ставки. Результаты представлены в таблице 2. В части активов банки увеличивают долю кредитования корпоративных клиентов (с 48,5% до 52,3%, то есть на 3,8 п.п.), поскольку крупные компании готовы брать кредиты даже под высокий процент, и одновременно сокращают кредитование физических лиц (с 24,2% до 21,1%, снижение на 3,1 п.п.), которые более чувствительны к росту ставок. Кроме того, наблюдается рост вложений в ценные бумаги (с 15,3% до 16,8%, увеличение на 1,5 п.п.), что позволяет фиксировать высокую доходность на длительный срок. В части пассивов происходит переток средств клиентов на срочные депозиты: доля средств корпоративных клиентов выросла на 4,5 п.п. (с 31,2% до 35,7%), а физических лиц – на 3,4 п.п. (с 29,8% до 33,2%) [4, 7, 9]. Это увеличивает стоимость фондирования, но обеспечивает стабильность ресурсной базы. Также заметно возрастает зависимость от рефинансирования Банка России: доля кредитов и депозитов ЦБ РФ выросла с 5,1% до 8,9% (+3,8 п.п.), что делает банковскую систему более уязвимой к действиям регулятора [6, с. 45–47].

Таблица 2

Структура активов и пассивов крупнейших банков РФ при различных значениях ключевой ставки

Показатель	Период низкой ставки (июль 2023, 7,5%)	Период высокой ставки (январь 2025, 21%)	Изменение, п.п.
1	*2*	*3*	*4*
Активы			
Доля кредитов корпоративным клиентам	48,5%	52,3%	+3,8
Доля кредитов физическим лицам	24,2%	21,1%	-3,1
Доля ценных бумаг	15,3%	16,8%	+1,5
Доля прочих активов	12,0%	9,8%	-2,2

Окончание табл. 2

1	*2*	*3*	*4*
Пассивы			
Доля средств корпоративных клиентов	31,2%	35,7%	+4,5
Доля средств физических лиц	29,8%	33,2%	+3,4
Доля кредитов и депозитов ЦБ РФ	5,1%	8,9%	+3,8
Доля собственных средств (капитал)	11,4%	9,3%	-2,1
Доля прочих обязательств	22,5%	12,9%	-9,6

Важно подчеркнуть, что все перечисленные структурные сдвиги в значительной степени реализуются с помощью цифровых инструментов управления качеством. Современные автоматизированные системы скоринга позволяют в реальном времени пересматривать лимиты на розничное кредитование, оперативно увеличивая долю корпоративных ссуд [2, с. 34]. Цифровые платформы управления ликвидностью (ALM-системы) дают возможность моделировать GAP-анализ и дюрацию портфеля, автоматически перераспределяя вложения между кредитами и ценными бумагами [3, с. 45]. Маркетинговая автоматизация обеспечивает целенаправленное привлечение срочных депозитов от клиентов, а API-подключения к платформам Банка России упрощают доступ к рефинансированию.

Цифровые вызовы и перспективы

Несмотря на очевидные преимущества цифровизации, в период 2022–2025 годов проявились и серьёзные вызовы. Первый вызов связан с качеством данных: запаздывание в отражении резервов по МСФО 9 и неполнота информации о заёмщиках приводили к занижению или завышению оценок кредитного риска. Нафиков Р.Г. подчёркивает, что риски, связанные с цифровизацией банковской системы, требуют особого внимания [3, с. 48–49]. Второй вызов – скорость реакции систем. Как показало исследование, временной лаг между изменением ключевой ставки и реакцией ROA составляет один квартал [5, 7, 9]. Это означает, что даже при наличии цифровых инструментов многие банки не успевают перестроить структуру баланса достаточно быстро. Маннанова А.Р. указывает, что эффективность цифровой трансформации в российских банках пока варьируется [2, с. 35–36]. Третий вызов – интеграция с регуляторными требованиями. Увеличение доли рефинансирования в пассивах до 8,9% требует автоматизированного соблюдения нормативов, что не всегда реализовано на уровне межсистемного взаимодействия [6, с. 50].

Перспективным решением является внедрение комплексных цифровых контуров управления качеством, включающих три блока: автоматический

скоринг и расчёт PD/LGD, ALM-моделирование с GAP-анализом и дюрацией, а также дашборды качества, визуализирующие ROA, ЧПМ и уровень резервов в реальном времени [1, с. 36]. При такой архитектуре входными параметрами выступают ключевая ставка и макроэкономические данные, а выходом – рекомендация по увеличению или снижению объёмов кредитования в конкретных сегментах. Внедрение подобных систем сокращает временной лаг с одного квартала до одной-двух недель, что критически важно в условиях волатильного рынка. Согласно прогнозам, опубликованным в «Коммерсантъ», банковский сектор продолжит адаптироваться к высоким ставкам в 2026 году [8].

Таким образом, проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы. Между ключевой ставкой Банка России и рентабельностью активов коммерческих банков существует сильная обратная корреляционная связь (коэффициент -0,78) с временным лагом в один квартал [5, 7, 9]. Банковский сектор демонстрирует высокую адаптивность, в частности за счёт переориентации кредитования на корпоративный сегмент, увеличения доли ценных бумаг и привлечения срочных депозитов [4, 7, 9]. Однако сдерживающим фактором для роста ROA выступает увеличение стоимости риска и замедление темпов кредитования. Ключевая роль цифровизации заключается в том, что автоматизированные системы скоринга, ALM-моделирования и дашборды качества позволяют банкам значительно быстрее перераспределять активы и пассивы в ответ на изменение ключевой ставки, сокращая негативное влияние на рентабельность [1, 2, 3]. Основными цифровыми вызовами остаются качество исходных данных, скорость реакции систем и необходимость бесшовной интеграции с регуляторной отчётностью [6]. Новизна полученных результатов состоит в количественной оценке влияния экстремальных изменений ключевой ставки на эффективность банковской деятельности с акцентом на цифровые механизмы управления качеством активов и пассивов.

Список литературы

1. Азизова А.Ф. Цифровизация как фактор финансовой состоятельности коммерческих банков: обзор современных трендов / А.Ф. Азизова, А.А. Аюпов. – Управленческий учет, 2025. – № 9. – С. 33–37.

2. Маннанова А.Р. Цифровизация российских коммерческих банков / А.Р. Маннанова. – Экономика и парадигма нового времени, 2025. – № 2. – С. 32–36.

3. Нафиков Р.Г. Цифровизация банковской системы: риски и возможности управления финансовыми активами / Р.Г. Нафиков. – Управленческие науки, 2022. – № 12(3). – С. 39–52.

4. Банк России. Аналитический обзор «Банковский сектор». – URL: https://www.cbr.ru/analytics/bank_sector/analytical_review_bs/ (дата обращения: 17.04.2026).

5. Банк России. Ключевая ставка Банка России. – URL: https://cbr.ru/hd_base/KeyRate/ (дата обращения: 17.04.2026).

6. Банк России. Основные направления единой государственной денежно-кредитной политики на 2025 год и период 2026–2027 годов – 2024. – 185 с. – URL: https://www.cbr.ru/about_br/publ/ondkp/on_2025_2027/ (дата обращения: 17.04.2026).

7. Банк России. Статистический бюллетень Банка России. – URL: https://cbr.ru/statistics/bbs/ (дата обращения: 17.04.2026).

8. Коммерсант. Банковский сектор России: анализ 2025 года и прогноз на 2026 год. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/8270555 (дата обращения: 17.04.2026).

9. Эксперт РА. Банковский сектор // Рейтинговое агентство «Эксперт РА». – 2025. – 9 сентября. – URL: https://raexpert.ru/researches/bank_sector_2025/ (дата обращения: 17.04.2026).

Бестаев С.К.
аспирант
Университет «Синергия»
Россия, Москва
best-serg@mail.ru

ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СОРТИРОВКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ ПРИ ИЗМЕНЧИВОМ СОСТАВЕ ВХОДНОГО ПОТОКА

Аннотация. В статье предложен подход к цифровому управлению качеством роботизированной сортировки твердых коммунальных отходов в условиях нестабильного состава входного потока. Исходной предпосылкой работы является положение о том, что для промышленных сортировочных комплексов недостаточно оценивать эффективность только по пропускной способности или числу операций отбора за единицу времени. Технологическая ценность роботизированной системы определяется её способностью поддерживать требуемые показатели чистоты выделяемых фракций, полноты извлечения целевых компонентов, точности распознавания и надёжности захвата при изменении морфологии, влажности, загрязнённости и плотности укладки материала на конвейере. Сформирована система показателей качества, включающая чистоту фракции, извлечение, производительность, точность распознавания, успешность захвата, доступность оборудования и устойчивость результата. Предложены коэффициент изменчивости входного потока и интегральный показатель качества, позволяющие связывать текущее состояние материала с выбором управляющих воздействий. Разработана структурно-функциональная схема цифрового контура, в котором данные технического зрения, параметры транспортирования и результаты отбора используются для адаптивной коррекции режимов работы. Показано, что перенос акцента с максимизации скорости на поддержание стабильности качества создаёт более обоснованную основу для проектирования и модернизации робототехнических комплексов подготовки отходов к утилизации.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; роботизированная сортировка; управление качеством; цифровой мониторинг; машинное зрение; технологические показатели; робототехническая система; подготовка к утилизации.

Bestaev S.K.
Postgraduate Student
University «Synergy»
Russia, Moscow
best-serg@mail.ru

DIGITAL QUALITY MANAGEMENT OF ROBOTIC SORTING OF MUNICIPAL SOLID WASTE UNDER VARIABLE INPUT STREAM COMPOSITION

Abstract. The article proposes an approach to digital quality management of robotic sorting of municipal solid waste under conditions of an unstable input stream composition. The starting premise is that for industrial sorting facilities it is insufficient to assess efficiency only by throughput or by the number of picking operations per unit time. The technological value of a robotic system is determined by its ability to maintain the required levels of fraction purity, target component recovery, recognition accuracy and gripping reliability when the morphology, moisture, contamination level and packing density of the material on the conveyor change. A system of quality indicators is formed, including fraction purity, recovery, productivity, recognition accuracy, gripping success, equipment availability and result stability. A coefficient of input stream variability and an integral quality indicator are proposed, making it possible to relate the current material state to the selection of control actions. A structural and functional scheme of the digital control loop is developed, in which machine vision data, conveying parameters and picking results are used for adaptive correction of operating modes. It is shown that shifting the focus from maximizing speed to maintaining stable quality creates a more substantiated basis for designing and upgrading robotic systems for waste pre-treatment and utilization.

Keywords: municipal solid waste; robotic sorting; quality management; digital monitoring; computer vision; process indicators; robotic system; waste pre-treatment.

Сортировка твердых коммунальных отходов постепенно перестает восприниматься как вспомогательная операция в общей цепочке обращения с отходами. Именно на этом этапе определяется, какие фракции могут быть направлены на дальнейшую переработку, насколько чистым окажется вторичное сырье и сколько ресурсов потребуется для последующей доочистки. В инженерном смысле сортировочный участок выступает узлом, где экономические, экологические и технологические требования сходятся в одном процессе. Поэтому повышение эффективности сортировки связано не только с механизацией операций, но и с обеспечением воспроизводимого качества результата [1], [2].

Промышленные линии обработки отходов работают в условиях, которые слабо похожи на лабораторную среду. Поток, поступающий на конвейер, непрерывно меняет морфологический состав, влажность, степень загрязнения и плотность укладки. В одном и том же технологическом цикле система может последовательно сталкиваться с жесткими пластиковыми объектами, деформированной упаковкой, бумажными включениями, пленкой, металлом и смешанными многослойными материалами. Для роботизированной сортировки это означает, что решение, показавшее приемлемый результат на одном фрагменте потока, не гарантирует того же качества уже через несколько минут работы [3].

В большинстве исследований по роботизации сортировки отходов акцент делается на распознавании объектов, архитектуре нейросетевых моделей или достижимой скорости отбора. Такой подход полезен для оценки частных тех-

нических характеристик, однако в производственной практике этого недостаточно. Оператору и проектировщику важен не сам по себе высокий темп манипуляции, а способность системы удерживать допустимые значения чистоты выделяемой фракции, извлечения полезных компонентов и доли успешных исполнительных действий. Другими словами, в центре внимания должна находиться не только автоматизация операций, но и управление качеством процесса как целостной технологической системы [4].

Особую сложность создает наличие доменного разрыва между экспериментальными наборами данных и реальным потоком отходов. На промышленной линии техническое зрение работает при пылевой нагрузке, нестабильной освещенности, бликах, частичном перекрытии объектов и изменении их геометрии. Исполнительный модуль, в свою очередь, ограничен доступностью объекта для захвата, проскальзыванием и случайным смещением предметов на движущейся ленте. Поэтому даже высокие показатели классификации, полученные на тестовых выборках, не гарантируют промышленно значимого качества сортировки [4], [5].

В связи с этим роботизированную сортировку целесообразно рассматривать как управляемый технологический процесс с обратной связью по качеству результата. Такой подход соответствует процессной логике систем менеджмента качества, где решение принимается не по одному локальному параметру, а на основе совокупности наблюдаемых характеристик и фактического результата [6]. Целью настоящей статьи является разработка подхода к цифровому управлению качеством роботизированной сортировки твердых коммунальных отходов при изменчивом составе входного потока.

Факторы, определяющие качество процесса

Методологическая основа исследования строится на представлении сортировочного комплекса как многоуровневой системы, в которой качество результата определяется взаимодействием технологического потока, подсистемы восприятия, модуля принятия решения и исполнительной робототехнической части. В рамках работы используются методы структурно-функционального анализа, сравнительного инженерного анализа и формализации показателей качества. Задача ставится не как поиск единственного оптимального режима, а как построение контура, способного адаптировать режимы работы к текущему состоянию потока.

На первом этапе выделены факторы, оказывающие наибольшее влияние на качество роботизированной сортировки (рис. 1). К ним отнесены: морфологическая неоднородность потока; влажность и загрязненность материала; плотность укладки и перекрытие объектов на ленте; изменчивость визуальных признаков; состояние сенсорной подсистемы; характеристики исполнительного механизма. Такое разбиение позволяет уйти от упрощенного представления, при котором качество связывается только с точностью нейросетевого распознавания. В действительности ошибка сортировки может возникнуть как на этапе классификации, так и вследствие недоступности объекта для отбора, неудачного захвата или неверно выбранной стратегии транспортирования.



Рис. 1. Группы факторов, влияющих на качество роботизированной сортировки ТКО

Система показателей и интегральный критерий

На втором этапе сформирована система показателей качества (табл.). В качестве базовых показателей предлагается использовать: чистоту фракции P, извлечение R, производительность Q, точность распознавания A_r, успешность захвата A_g, доступность оборудования D и устойчивость качества S. Первые два показателя отражают технологическую ценность результата, последующие три характеризуют эффективность информационной и исполнительной подсистем, а показатель устойчивости позволяет оценивать чувствительность комплекса к изменениям условий работы. Тем самым качество трактуется не как разовая характеристика, а как способность системы удерживать требуемый результат в течение времени.

Таблица

Система показателей качества роботизированной сортировки

Показатель	Содержание показателя	Ед. изм.	Управленческое значение
Чистота фракции P	Доля целевого материала в выделенной фракции	%	Показывает технологическую пригодность вторичного сырья
Извлечение R	Доля целевого материала, извлеченная из входного потока	%	Характеризует полноту отбора полезного компонента
Производительность Q	Масса обработанного потока за единицу времени	т/ч	Оценивает пропускную способность участка
Точность распознавания A_r	Доля корректно классифицированных объектов	%	Отражает качество работы системы зрения
Успешность захвата A_g	Доля объектов, корректно захваченных и сброшенных в нужную фракцию	%	Характеризует надежность исполнительной подсистемы
Доступность D	Доля времени работоспособного состояния комплекса	%	Показывает влияние простоев на итоговый результат
Устойчивость S	Способность удерживать показатели P и R при изменении потока	безр.	Оценивает чувствительность системы к вариативности условий

Для перехода от частных оценок к обобщенной характеристике предложен интегральный показатель качества:

$$K_q = w1*P_n + w2*R_n + w3*A_rn + w4*A_gn + w5*D_n, \text{ где}$$

нормированные значения показателей умножаются на весовые коэффициенты, выбираемые в зависимости от назначения участка. Для участка контрольной сортировки больший вес целесообразно придавать чистоте фракции и успешности захвата, тогда как на этапе предварительного разделения более значимыми могут быть извлечение и производительность. Такая схема не претендует на универсальный набор весов, но задает формализованный способ адаптации критерия к технологической задаче.

Коэффициент изменчивости входного потока и логика цифрового контура

Для описания текущей сложности обрабатываемого материала введен коэффициент изменчивости входного потока:

$$V_in = a1*M + a2*W + a3*O + a4*C, \text{ где}$$

M характеризует морфологическую неоднородность, W – влажность и загрязненность, O – плотность укладки и перекрытие объектов, C – сложность визуальной классификации. Коэффициент V_in не заменяет частные технологические показатели; его задача состоит в том, чтобы оперативно оценивать, насколько текущий поток способен вызвать деградацию качества. При росте V_in система управления должна переходить от режима максимальной производительности к режиму поддержания допустимых показателей качества.

Цифровой контур управления строится как замкнутый цикл, включающий сбор данных, анализ состояния потока, вычисление показателей качества, принятие решения и коррекцию режимов работы (рис. 2). Источниками данных выступают изображения конвейерной зоны, параметры транспортирования, данные о состоянии исполнительных органов и результаты контрольного измерения выходной фракции. Управляющими воздействиями могут быть изменение скорости конвейера, коррекция плотности подачи, изменение порога уверенности классификатора, перераспределение приоритетов отбора, переключение стратегии захвата и активация режима контрольной сортировки. Важной особенностью контура является то, что решение принимается не только по признакам объекта, но и по фактической эффективности предыдущих действий.



Рис. 2. Структурно-функциональная схема цифрового контура управления качеством

На основе предложенной методологии разработана структурно-функциональная схема цифрового управления качеством роботизированной сортировки ТКО. В ее состав входят узел подготовки и дозированной подачи материала, зона сенсорного контроля, модуль вычисления характеристик потока, блок оценки качества, модуль принятия решений, роботизированный манипулятор с захватным устройством, а также узел накопления статистики и обратной связи. По сравнению с упрощенной архитектурой «распознавание – захват – сброс» данная схема содержит самостоятельный уровень анализа технологического результата, что позволяет рассматривать сортировку как управляемый процесс, а не как набор изолированных операций.

Проведенный анализ показывает, что в условиях высокой изменчивости потока стремление сохранять постоянную производительность нередко приводит к снижению чистоты целевой фракции и росту числа ошибочных действий. Для практической эксплуатации более рациональной является стратегия, при которой при ухудшении наблюдаемости и захватываемости система уменьшает скорость транспортирования, повышает требования к уверенности распознавания и временно перераспределяет приоритеты отбора. Иными словами, цифровое управление должно быть ориентировано не на абсолютный максимум темпа, а на удержание качества в допустимом диапазоне.

Предложенная система показателей удобна тем, что может использоваться для разных архитектур сортировочных участков. На линии предварительного разделения приоритет имеют производительность, извлечение и доступность оборудования. На участке контрольной сортировки, наоборот, решающее значение приобретают чистота фракции, точность распознавания и успешность захвата. Для мобильных и компактных комплексов, работающих в условиях ограниченной инфраструктуры, особую роль играет устойчивость качества, поскольку даже небольшие отклонения по пылевой нагрузке, влажности или плотности укладки способны резко ухудшить результат.

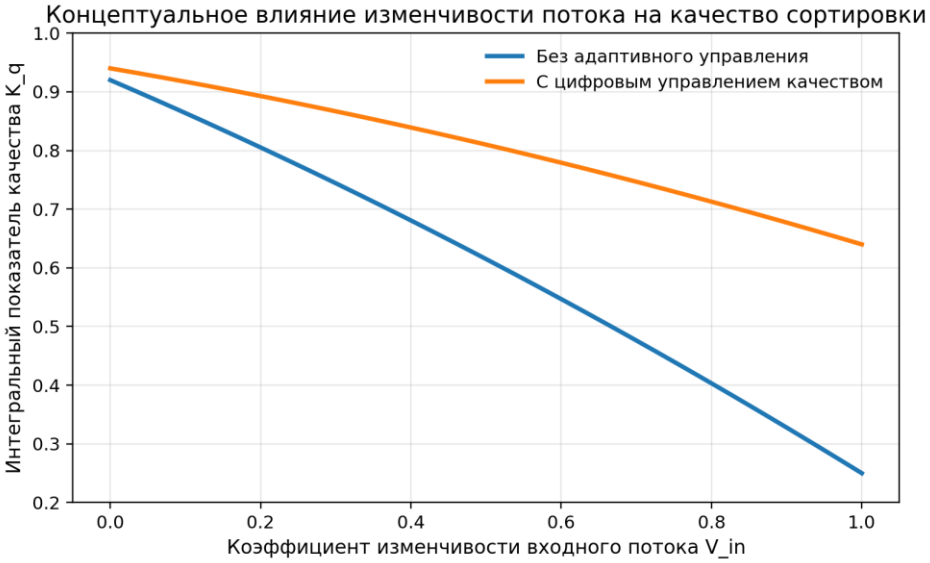


Рис. 3. Концептуальное влияние изменчивости потока на интегральный показатель качества

Практическая значимость разработанного подхода состоит в возможности накопления технологических данных и перехода от реактивного управления к проактивной настройке системы. Если статистика показывает, что ухудшение чистоты фракции регулярно возникает при определенном сочетании плотности слоя и доли мягкой упаковки, система может заранее изменить режим подачи или стратегию захвата. Аналогично, постепенное снижение точности распознавания при сохранении других параметров может служить индикатором загрязнения оптики или дрейфа модели и инициировать техническое обслуживание либо дообучение классификатора.

С научной точки зрения новизна работы заключается в том, что роботизированная сортировка рассматривается не через призму отдельных аппаратных или алгоритмических решений, а как объект цифрового управления качеством. Введенные показатели, коэффициент V_in и интегральный критерий K_q образуют единую рамку, в которой можно сопоставлять различные компоновочные решения, режимы работы и стратегии отбора. Такой подход создает методическую основу для проектирования новых комплексов и модернизации действующих линий подготовки отходов к утилизации.

Роботизированная сортировка твердых коммунальных отходов способна обеспечить заметный технологический эффект только в том случае, если управление системой строится с учетом изменчивости входного потока и реальных ограничений промышленной среды. В противном случае высокая скорость отдельных операций не трансформируется в устойчивое качество выделяемых фракций.

В статье предложен подход к цифровому управлению качеством, основанный на совместном анализе параметров потока, результатов распознавания, успешности исполнительных действий и эксплуатационного состояния

комплекса. Сформирована система частных показателей, введен коэффициент изменчивости входного материала и предложен интегральный критерий качества, пригодный для адаптивной коррекции режима работы.

Полученные результаты позволяют рассматривать роботизированную сортировку ТКО как управляемую технологическую систему с обратной связью по качеству. Практическое применение предложенного подхода возможно при проектировании новых линий, модернизации существующих комплексов, разработке мобильных сортировочных модулей и создании цифровых платформ мониторинга. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную верификацию весовых коэффициентов интегрального критерия, отработку алгоритмов адаптивной настройки и накопление промышленных датасетов для оценки устойчивости качества в реальном времени.

Список литературы

1. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».
2. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P. [et al.] What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, Washington, DC : World Bank, 2018. 295 p.
3. Sarc R., Curtis A., Kandlbauer L. [et al.] Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management: a review // Waste Management. 2019. Vol. 95. P. 476–492.
4. Thielmann P., Zhou Y., Mirbach B. [et al.] A Review of Computer Vision for Industrial-Grade Waste Classification // IEEE Access. 2025. Vol. 13. P. 42766–42803.
5. TOMRA. AUTOSORT: Automated Sorting Systems for Recycling : электронный ресурс // TOMRA : [сайт]. URL: https://www.tomra.com/waste-metal-recycling/products/machines/autosort (дата обращения: 21.04.2026).
6. U.S. Plastics Pact. AMP Robotics: AI Platform for Small Format Recycling : электронный ресурс // U.S. Plastics Pact : [сайт]. URL: https://usplasticspact.org/case-study/amp-robotics/ (дата обращения: 21.04.2026).
7. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.
8. OECD. Digital Technologies for Better Enforcement of Waste Regulation and Elimination of Waste Crime. Paris : OECD Publishing, 2024.

Альмусави Мустафа Рияд Кетаб
аспирант
НИТУ МИСИС
Москва, Россия
adammadam265@gmail.com
Ляпунцова Е.В.
д.т.н., профессор кафедры «Инновационное предпринимательство»
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия
lev86@bmstu.ru

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ЖЕЛУДКА: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЖКТ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПАЦИЕНТОВ

Аннотация. В работе предложен прототип цифрового двойника желудка, предназначенный для персонализированного прогноза неблагоприятного исхода и стратификации пациентов по риску на основе клинических и транскриптомных данных. В качестве источника использованы открытые данные Атласа генома рака (когорта аденокарциномы желудка): для 412 пациентов доступны значения генной экспрессии первичной опухоли, после контроля качества клинических сведений и формирования задачи «время до события» в анализ включены 385 пациентов (158 событий и 227 цензурированных наблюдений). Для устранения нулевых значений длительности наблюдения применено исправление до 1 дня с сохранением соответствующего признака. Состояние цифрового двойника представлено тремя вариантами: (1) только клинические признаки; (2) клинические признаки и отобранные по обучающей выборке гены; (3) клинические признаки и компактное транскриптомное представление, полученное методом главных компонент. Прогноз выполнен регуляризованной регрессией Кокса с подбором параметров по перекрестной проверке и оценкой на контрольной выборке (308/77). На контрольной выборке компактное состояние цифрового двойника показало наилучшее качество: индекс согласия Харрелла 0,629 и индекс согласия Уно с учетом цензурирования 0,662 (клиническая модель: 0,623 и 0,654). Стратификация по порогу риска, вычисленному на обучающей выборке, обеспечивает статистически различимое разделение кривых выживаемости (логранговый критерий p=0,035). Дополнительно выполнены проверка калибровки на горизонтах 365 и 730 дней и бутстрэп-оценка доверительных интервалов (300 повторов).

Ключевые слова: цифровой двойник; желудок; аденокарцинома; генная экспрессия; клинические данные; анализ времени до события; регрессия Кокса; стратификация риска; калибровка прогноза.

Almusawi Mustafa Riyadh Ketab
Postgraduate Student
NUST MISIS
Russia, Moscow
adammadam265@gmail.com
Lyapuntsova E.V.
Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Innovative Entrepreneurship
Bauman Moscow State Technical University
Russia, Moscow
lev86@bmstu.ru

DIGITAL STOMACH TWIN: PREDICTING GI DISEASES BASED ON PATIENT DATA

Abstract. This paper presents a prototype digital twin of the stomach aimed at personalized risk prediction and patient stratification using clinical and transcriptomic data. We use the open stomach adenocarcinoma cohort from The Cancer Genome Atlas. Gene expression measurements for primary tumors are available for 412 patients; after clinical quality control and construction of the time-to-event target, 385 patients remain in the survival cohort (158 events and 227 censored observations). Zero follow-up times are corrected to 1 day while preserving an explicit indicator feature. The digital twin "patient state" is defined in three representations: (1) clinical features only; (2) clinical features plus a set of genes selected on the training set by non-zero fraction and variance; (3) clinical features plus a compact transcriptomic state obtained by principal component analysis. Prognostic modeling is performed with a regularized Cox regression, with hyperparameters tuned via cross-validation and final evaluation on a held-out test set (308/77 split). On the test set, the compact digital-twin state yields the best performance: Harrell's concordance index 0,629 and an inverse-probability-of-censoring-weighted concordance index (Uno's) 0,662, compared with 0,623 and 0,654 for the clinical baseline. Risk stratification using a threshold derived from the training set achieves statistically distinguishable survival curves on the test set (log-rank p=0,035). We additionally report calibration at 365 and 730 days and bootstrap confidence intervals based on 300 resamples, supporting the robustness of the proposed compact patient-state representation.

Keywords: digital twin; stomach; adenocarcinoma; gene expression; clinical data; survival analysis; Cox regression; risk stratification; calibration.

Рак желудка сохраняет заметный вклад в мировую онкологическую заболеваемость и смертность, а клиническое течение болезни отличается выраженной неоднородностью даже внутри одной морфологической группы. Глобальная статистика за 2022 год показывает, что опухоли желудка остаются среди ведущих причин смерти от злокачественных новообразований, а доля желудка среди локализаций рака заметна как в структуре новых случаев, так и в структуре смертности [1]. Для врача практическая сложность сводится к ранней оценке риска неблагоприятного исхода и выбору тактики наблюдения, когда сведения о пациенте неполны, а показатели меняются во времени.

Цифровой двойник в медицине понимается как индивидуализированная вычислительная модель пациента, способная обновляться по мере поступления новых данных и выдавать прогноз, полезный для принятия решений. Современные обзоры подчеркивают, что работоспособность цифрового двойника определяется не только выбором алгоритма, но и тем, насколько аккуратно задано «состояние пациента», объединяющее разнородные источники данных, а также насколько воспроизводимо организованы сбор, контроль качества и проверка модели [2]. Для заболеваний желудка особенно перспективной выглядит интеграция клинических сведений и молекулярных измерений, поскольку клинические признаки отражают этапность процесса, а транскриптомные профили фиксируют активность биологических путей, связанных с агрессивностью опухоли [2].

Прогноз исхода в задачах «время до события» осложняется цензурированием, когда часть пациентов остается под наблюдением без зарегистрированного события к моменту завершения сбора данных. Сопоставление моделей по индексу согласия Харрелла широко распространено, однако наличие цензурирования способно смещать оценку дискриминации, поэтому методические работы рекомендуют применять взвешенные варианты, учитывающие вероятность наблюдаемости событий, в частности индекс согласия Уно на основе обратных вероятностей цензурирования [4]. Применение корректных метрик позволяет сравнивать модели честнее и уменьшает риск ложного «улучшения» качества, обусловленного структурой наблюдений, а не реальной прогностической силой признаков [4].

Открытые онкологические хранилища данных создают основу для воспроизводимых экспериментов, где доступна как клиника, так и результаты секвенирования. Платформа NCI Genomic Data Commons предоставляет гармонизированные наборы РНК-секвенирования, в которых измерения экспрессии генов получены конвейером STAR и дополнены преобразованиями, включающими значения TPM, FPKM и FPKM-UQ, а также аннотацией генов; для сопоставимости образцов при обработке чтения рассматриваются как неполярные (unstranded) [3]. Подобная стандартизация упрощает переносимость вычислительных процедур между выпусками данных и снижает долю «скрытых» различий, возникающих при самостоятельной предобработке.

Предлагаемый прототип цифрового двойника желудка опирается на формализованное представление состояния пациента и на единый протокол проверки, исключающий утечки информации между обучением и контролем качества. Цель исследования заключается в построении и сравнении трех вариантов состояния пациента для прогноза риска неблагоприятного исхода: клинического, интерпретируемого клинико-транскриптомного и компактного клинико-транскриптомного. Для достижения цели решаются задачи: 1) сформировать когорту пациентов и целевые переменные «событие» и «время», выполняя явный контроль качества; 2) задать признаки состояния пациента, отбирая гены и параметры преобразований только по обучающей выборке; 3) обучить модель регрессии Кокса с регуляризацией и оценить качество по индексу Харрелла и индексу Уно, дополнив сравнение кривыми Каплана – Майера и проверкой калибровки вероятности выживания на фиксированных горизонтах [3, 4].

Критерием успешности цифрового двойника становится не только рост средней метрики, но и устойчивость результата при повторной выборке и при переносе порога стратификации риска, рассчитанного по обучающей выборке, на контрольную. В качестве основного инженерного компромисса рассматривается компактное состояние пациента, формируемое методом главных компонент по матрице экспрессии: подобное сжатие уменьшает размерность и ослабляет влияние мультиколлинеарности, сохраняя большую часть вариативности транскриптома, тогда как прямое включение тысяч

генов требует более жесткой регуляризации и чаще приводит к ухудшению обобщающей способности. Выбор индекса Уно для ключевого сравнения дополнительно оправдан наличием цензурирования и стремлением получить оценку дискриминации, менее зависимую от структуры наблюдений [4].

Формализация цифрового двойника желудка выполнена через представление «состояния пациента», которое связывает клинические сведения и показатели генной экспрессии в единую систему признаков и допускает обновление при поступлении новых данных. Состояние задается тремя альтернативами, различающимися степенью сжатия транскриптомной информации: клинический вариант, интерпретируемый клинико-транскриптомный вариант и компактный клинико-транскриптомный вариант на основе главных компонент. Подобная постановка позволяет обсуждать цифровой двойник не как набор разрозненных моделей, а как воспроизводимую схему описания пациента, где форма состояния определяет устойчивость прогноза и качество стратификации риска.

Протокол построения состояния пациента спроектирован так, чтобы исключить утечки информации между обучающей и контрольной выборками и тем самым обеспечить корректность сравнений. Отбор информативных генов, параметры нормирования и построение главных компонент выполняются только по обучающей части, после чего фиксируются и применяются к контрольной выборке без подстройки. Порог разделения на группы риска также вычисляется по обучающей выборке и переносится на контрольную, благодаря чему проверка стратификации отражает способность модели работать на новых данных, а не подгонку под тестовые наблюдения.

Новизна методики проявляется в том, что сравнительный эксперимент организован не вокруг «лучшей модели любой ценой», а вокруг устойчивости и переносимости представления цифрового двойника. Компактное состояние рассматривается как инженерно-обоснованный компромисс между информативностью и сложностью: сжатие транскриптома уменьшает размерность и ослабляет мультиколлинеарность, сохраняя прогностический сигнал, тогда как прямое включение тысяч генов требует жесткой регуляризации и чаще приводит к ухудшению обобщающей способности. Подтверждение этого эффекта в едином протоколе формирует практический вывод о том, что цифровой двойник выигрывает от контролируемого «сжатия биологии» до устойчивых латентных факторов.

Вклад работы заключается в построении воспроизводимого конвейера, который доводит открытые данные до пригодного для прогнозирования набора признаков и целевых переменных. Контроль качества клинических полей включает явную обработку пропусков и корректировку нулевых длительностей наблюдения с сохранением диагностического признака, что повышает прозрачность подготовки данных и позволяет анализировать влияние исправлений на прогноз. Сформированный набор артефактов – список

включенных пациентов, правила предобработки, параметры преобразований и итоговые модели – делает эксперимент повторяемым и удобным для расширения на другие когорты и дополнительные модальности.

Практическая значимость результата выражается в том, что прототип цифрового двойника обеспечивает персонализированную оценку риска и позволяет отнести пациента к группе повышенного или пониженного риска в рамках стандартизированного сценария применения. В качестве итогового продукта выступает не только численная метрика качества, но и интерпретируемая процедура формирования риска, дополненная проверкой калибровки и оценкой неопределенности на бутстрэп-повторах. Подход задает основу для последующего развития цифрового двойника в сторону динамических данных наблюдения и клинически ориентированных сценариев «что будет, если» при появлении новых признаков пациента.

Когорта аденокарциномы желудка TCGA-STAD выбрана как репрезентативный открытый источник, в котором клинические сведения согласованы с результатами секвенирования РНК и доступны в едином хранилище. Портал Genomic Data Commons публикует для TCGA-STAD 443 клинических случая и наборы файлов по нескольким категориям данных, что позволяет формально зафиксировать состав исходной совокупности пациентов до любых преобразований [5]. Дальнейшая работа ограничивается образцами первичной опухоли, поскольку смешение тканевых типов приводит к систематическим различиям в профилях экспрессии и усложняет интерпретацию.

Извлечение данных генной экспрессии выполнялось по критериям «первичная опухоль», «квантование экспрессии генов» и «конвейер STAR-Counts», формирующий табличные файлы с количественными оценками экспрессии и аннотациями генов [6, 8]. Документация конвейера указывает, что сырые счеты чтений дополняются несколькими преобразованиями, включая TPM, FPKM и FPKM-UQ, что позволяет выбирать единый показатель для построения матрицы «пациенты × гены» [6]. Для последующего моделирования использовались значения TPM как наиболее удобные для сравнительного анализа после логарифмирования, при этом идентификаторы генов приводились к каноническому виду без версии (удаление суффикса после точки), чтобы избежать искусственного «дробления» признаков.

Сопоставление клинических и транскриптомных записей организовано по идентификатору пациента, а затем проводится контроль качества целевых переменных «событие» и «время наблюдения». Логика контроля качества включает проверку наличия исхода и длительности наблюдения, исключение записей с отсутствующими значениями и отдельную обработку нулевой длительности наблюдения, заменяемой на 1 день с сохранением признака «исправлено». Таблица 1 фиксирует итоговые размеры когорты на каждом шаге: 412 пациентов с данными экспрессии для первичной опухоли и 385 пациентов после контроля качества для анализа «время до события»,

а также распределение событий и цензурирования и состав обучающей и контрольной выборок.

Таблица 1

Характеристика данных и когорты исследования

Показатель	Значение
Проект данных	TCGA-STAD (аденокарцинома желудка)
Всего пациентов с клиническими сведениями	443
Пациенты с данными генной экспрессии (первичная опухоль)	412
Пациенты после контроля качества для анализа времени до события	385
События (смерть)	158
Цензурирование (наблюдение без события)	227
Записи без времени наблюдения (исключены)	27
Записи с нулевым временем наблюдения (исправлены до 1 дня)	19
Обучающая выборка	308
Контрольная выборка	77
События в обучающей выборке	126
Цензурирование в обучающей выборке	182
События в контрольной выборке	32
Цензурирование в контрольной выборке	45

Скачивание файлов выполнялось программно через интерфейс Genomic Data Commons, который поддерживает выдачу одного файла по идентификатору и формирование архива при передаче списка идентификаторов. Руководство по интерфейсу описывает, что запрос к точке доступа данных может возвращать архив в формате tar.gz при скачивании множества файлов, что удобно для пакетной загрузки больших когорт [7].

Сохранение перечня идентификаторов и параметров фильтрации рассматривается как часть воспроизводимости эксперимента, поскольку позволяет повторить выборку без ручных операций.

Метод цифрового двойника желудка. Состояние пациента в прототипе цифрового двойника задается как вектор признаков, который однозначно строится из клинических сведений и данных генной экспрессии и затем используется для прогноза времени до неблагоприятного события. Рисунок 1 показывает, как два источника данных сходятся в узле сопоставления записей, после чего поток обработки разделяется на этапы контроля качества, формирования обучающей и контрольной выборок и построения признаков. Подобная схема позволяет обсуждать цифровой двойник как воспроизводимую методику описания пациента, а не как «одну удачную модель», полученную на конкретной настройке.

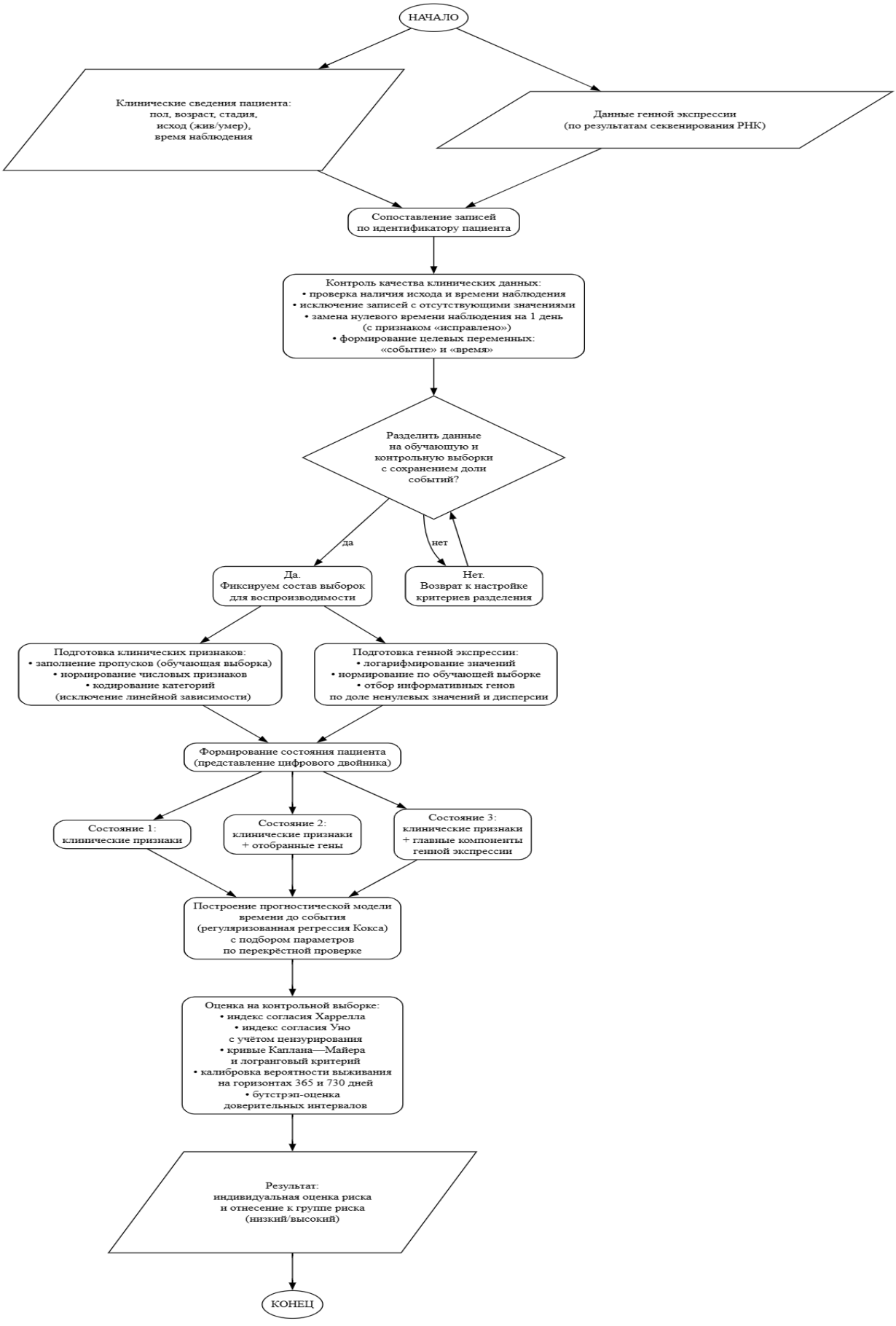


Рис. 1. Схема построения прототипа цифрового двойника желудка и протокола вычислительного эксперимента

Клинический блок признаков формируется из возраста, пола, стадии и укрупненных категорий диагноза, расы и этнической принадлежности, а также из признака исправления нулевого времени наблюдения. Пропуски числовых полей заполняются по статистикам обучающей выборки, после чего выполняется нормирование, чтобы признаки имели сопоставимый масштаб при регуляризации. Категориальные поля кодируются индикаторами с исключением линейной зависимости, поэтому в каждой группе категорий оставляется опорная категория, а остальные значения задаются бинарными признаками; соответствующая логика отражена в таблице 2.

Таблица 2

Формирование признаков состояния пациента

Блок	Параметры
Клинические признаки	возраст; пол; стадия; группа диагноза; группа расы; группа этнической принадлежности; признак исправления нулевого времени наблюдения; заполнение пропусков и нормирование по обучающей выборке
Преобразование генной экспрессии	логарифмирование значений; нормирование по обучающей выборке
Отбор генов (по обучающей выборке)	доля ненулевых значений ≥ 0,10; дисперсия > 1e-8; отобрано 2000 генов
Компактное состояние	метод главных компонент: 50 компонент; суммарно объяснено 0,732 дисперсии признаков генной экспрессии
Представления состояния (для сравнения)	1) только клиника; 2) клиника + отобранные гены; 3) клиника + главные компоненты

Транскриптомный блок признаков строится из значений TPM, преобразованных логарифмированием, что уменьшает влияние редких экстремальных значений и стабилизирует дисперсию. Отбор генов проводится только по обучающей выборке по двум критериям – доля ненулевых значений и дисперсия, – чтобы исключить признаки, не несущие вариативности в данной когорте. Таблица 2 фиксирует параметры отбора и число оставшихся генов, поскольку смена порогов приводит к изменению размерности пространства признаков и, следовательно, к иной степени регуляризации модели.

Компактное представление состояния пациента формируется методом главных компонент по матрице отобранных транскриптомных признаков, обученным только на обучающей выборке. Вычисление главных компонент сводит высокоразмерный транскриптом к ограниченному числу ортогональных факторов, уменьшая мультиколлинеарность и риск переобучения при сохранении существенной доли вариативности данных. В схеме на рисунке 1 компактное состояние выделено как отдельная ветвь, поскольку именно оно претендует на роль «ядра» цифрового двойника, обеспечивающего устойчивый прогноз при переносе на контрольную выборку.

Прогноз времени до события реализуется регуляризованной регрессией Кокса, где вклад каждого признака интерпретируется через коэффициент риска, а регуляризация управляет сложностью модели и устойчивостью оценок. Реализация в библиотеке lifelines поддерживает смешанную регуляризацию с параметрами силы штрафа и доли L1-компоненты, что удобно

при сравнении клинического, компактного и интерпретируемого представлений состояния пациента в едином протоколе [9]. Настройка параметров выполняется перекрестной проверкой на обучающей выборке, а контрольная выборка используется только для финальной оценки и построения кривых выживаемости по группам риска, что исключает подстройку результата под тестовые наблюдения.

Разделение выборки на обучающую и контрольную части выполнено до подбора параметров и сравнения моделей, чтобы оценка качества отражала работу алгоритма на новых пациентах, а не адаптацию к данным. Разметка события строилась по статусу исхода, а длительность наблюдения задавалась временем до смерти либо временем до последнего контакта при цензурировании; нулевые длительности исправлялись до 1 дня с сохранением диагностического признака, после чего в анализ включено 385 пациентов (158 событий и 227 цензурированных наблюдений). Обучающая выборка включила 308 пациентов, контрольная – 77; стратификация по доле событий применялась для сохранения сопоставимого соотношения классов в обеих частях.

Сравнение моделей организовано вокруг трех представлений состояния пациента, описанных ранее: клинического, интерпретируемого клинико-транскриптомного и компактного клинико-транскриптомного. Генная экспрессия преобразовывалась логарифмированием и нормировалась по обучающей выборке, затем выполнялся отбор 2000 генов по доле ненулевых значений и дисперсии на обучающей части, после чего строилось компактное представление методом главных компонент в размерности 50, объясняющее 0,732 суммарной дисперсии признаков экспрессии. Методические рекомендации по построению и проверке прогностических моделей подчеркивают важность выполнения всех шагов отбора признаков и настройки преобразований внутри обучающей процедуры, поскольку перенос этих решений на контрольную часть предотвращает оптимистическое смещение оценки качества [13].

Прогноз времени до события реализован регуляризованной регрессией Кокса; параметры регуляризации подбирались по перекрестной проверке на обучающей выборке. В качестве метрики подбора использовался индекс согласия, рассчитанный по риск-оценкам модели, а итоговая проверка проводилась на контрольной выборке. Практику оценки дискриминации и калибровки для моделей времени до события удобно описывать через раздельные компоненты качества: способность упорядочивать пациентов по риску и согласованность предсказанных вероятностей выживания с наблюдаемыми долями [13].

Таблица 3 фиксирует найденные параметры регуляризации и качество перекрестной проверки для каждого варианта состояния пациента. Клиническая модель достигла среднего индекса согласия 0,679 ± 0,027 при параметрах 0,1 и доле L1-штрафа 0,2; компактный цифровой двойник показал

0,674 ± 0,022 при тех же параметрах; интерпретируемое представление с 2000 генов дало 0,607 ± 0,037 при параметре 0,1 и нулевой доле L1-штрафа.

Таблица 3

Лучшие параметры регуляризации и результат перекрестной проверки

Модель	Лучший параметр регуляризации	Доля L1-штрафа	Индекс согласия (перекрестная проверка), среднее ± стандартное отклонение
Клиническая модель	0,1	0,2	0,679 ± 0,027
Цифровой двойник (компактное состояние)	0,1	0,2	0,674 ± 0,022
Цифровой двойник (интерпретируемое состояние)	0,1	0,0	0,607 ± 0,037

Зафиксированное снижение качества для высокоразмерного интерпретируемого состояния согласуется с известной сложностью моделей выживаемости при «шумных» омикс-признаках и подчеркивает роль устойчивого сжатия признаков и регуляризации при работе с транскриптомом [14].

Сравнение на контрольной выборке показывает, что компактное состояние цифрового двойника дает наилучшую дискриминацию, хотя разница с клинической моделью остается умеренной. Таблица 4 отражает три ключевых показателя: индекс согласия Харрелла, индекс согласия Уно с учетом цензурирования и p-значение логрангового критерия для кривых выживаемости при пороге риска, вычисленном по обучающей выборке. Значения индекса Харрелла составили 0,623 для клинической модели, 0,629 для компактного цифрового двойника и 0,618 для интерпретируемого состояния; индексы Уно равны 0,654, 0,662 и 0,629 соответственно при τ=1132,3 дня. Документация scikit-survival подчеркивает, что оценка Харрелла может быть оптимистичной при заметной доле цензурирования, тогда как взвешенный вариант на основе обратных вероятностей цензурирования дает менее смещенную оценку, что делает индекс Уно предпочтительным для итогового сравнения [10].

Таблица 4

Итоговые результаты на контрольной выборке

Показатель	Клиническая модель	Цифровой двойник (компактное состояние)	Цифровой двойник (интерпретируемое состояние)
Индекс согласия Харрелла	0,623	0,629	0,618
Индекс согласия Уно с учетом цензурирования (порог времени τ=1132,3 дня)	0,654	0,662	0,629
Логранговый критерий для кривых Каплана–Майера (порог риска по обучающей выборке), p-значение	0,012	0,035	0,243
Лучшая модель по индексу Уно		Да	

Кривые Каплана – Майера на рисунках 2–4 иллюстрируют разделение пациентов на группы риска при пороге, вычисленном по медиане риск-оценок на контрольной выборке. Подобная визуализация удобна для первичной диагностики поведения модели, однако порог, заданный по контрольной выборке, методически слабее для отчетного результата, поскольку использует информацию из данных проверки при настройке процедуры стратификации. Рисунки 2–4 демонстрируют сходный характер кривых для всех трех моделей: кривая высокой группы риска снижается быстрее, а различия заметнее в средней части временного интервала, где сосредоточено больше событий.

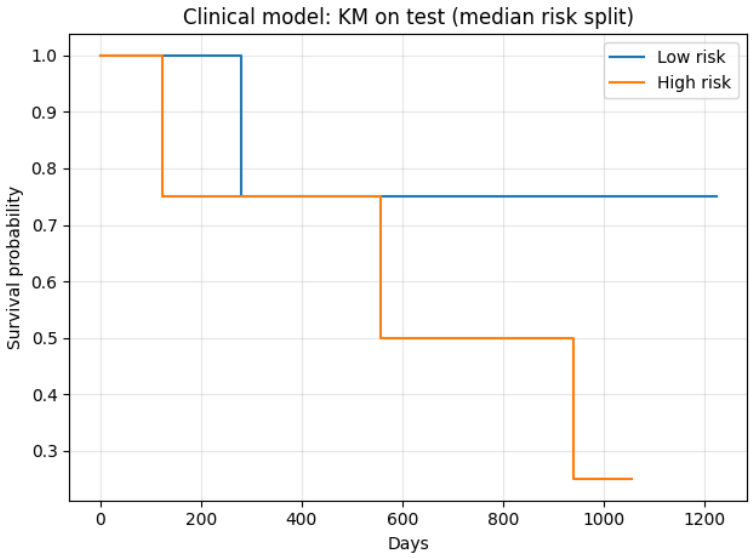


Рис. 2. Кривые Каплана – Майера на контрольной выборке: клиническая модель (разделение по медиане прогностического риска, вычисленной по контрольной выборке)

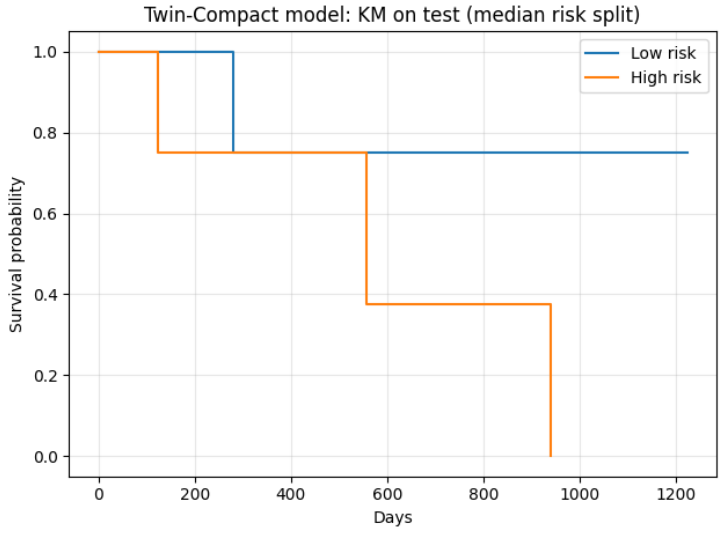


Рис. 3. Кривые Каплана – Майера на контрольной выборке: модель цифрового двойника с компактным состоянием (разделение по медиане прогностического риска, вычисленной по контрольной выборке)

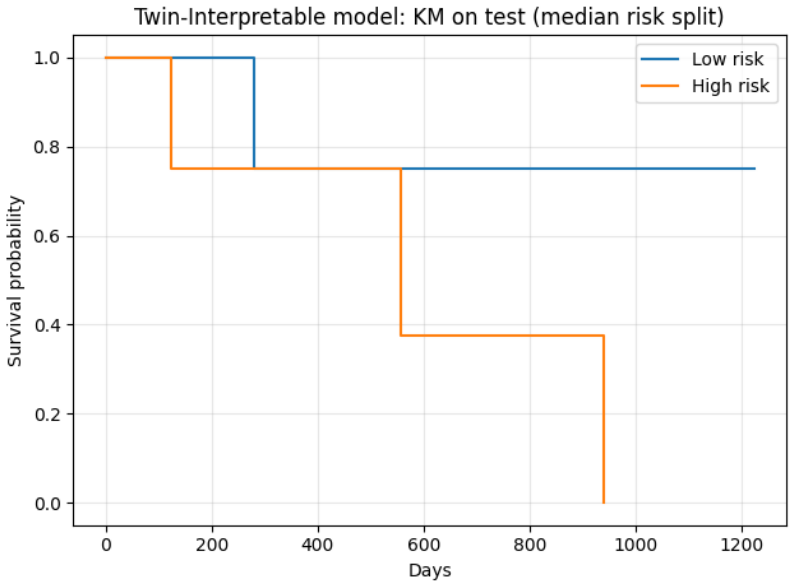


Рис. 4. Кривые Каплана – Майера на контрольной выборке: модель цифрового двойника с интерпретируемым состоянием (разделение по медиане прогностического риска, вычисленной по контрольной выборке)

Рисунки 5–7 показывают основную для обсуждения постановку, в которой порог стратификации вычислен по медиане риск-оценок на обучающей выборке и затем перенесен на контрольную.

Клиническая модель на рисунке 5 демонстрирует отчетливое расхождение кривых для групп низкого и высокого риска при p=0,012, что согласуется с ожидаемой прогностической значимостью клинических факторов. Компактный цифровой двойник на рисунке 6 сохраняет разделение кривых при p=0,035 и, в отличие от интерпретируемого состояния, поддерживает статистически различимую стратификацию при переносе порога.

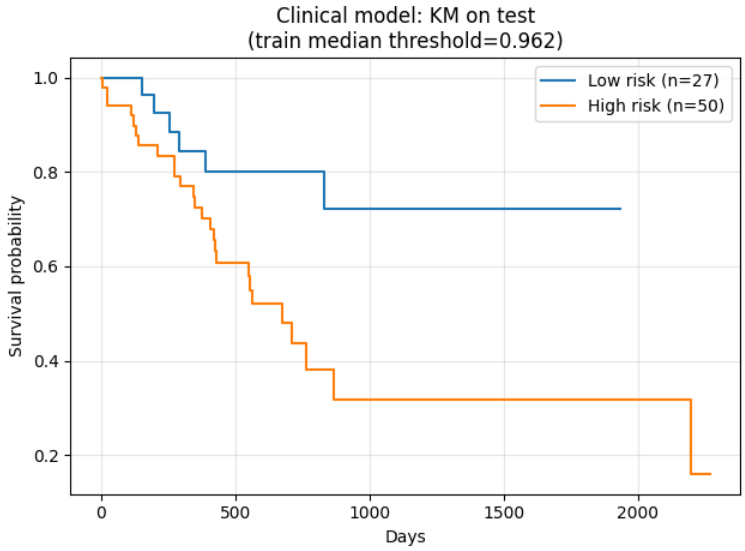


Рис. 5. Кривые Каплана – Майера на контрольной выборке: клиническая модель (порог риска – медиана риска по обучающей выборке)

Руководство [12] отдельно оговаривает, что логранговый критерий обладает наибольшей мощностью при выполнении предположения о пропорциональности рисков и может давать некорректную оценку при пересечении кривых, поэтому интерпретация p-значения должна сопровождаться визуальным анализом формы кривых.

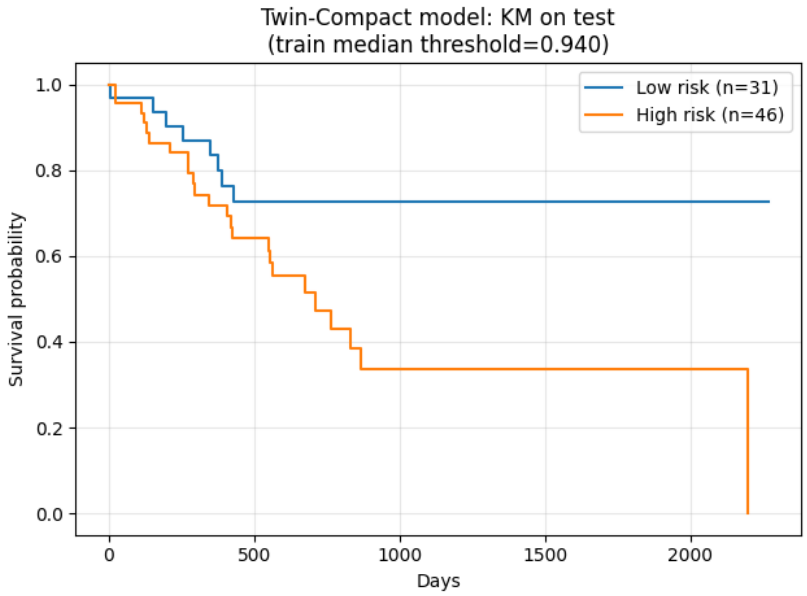


Рис. 6. Кривые Каплана – Майера на контрольной выборке: модель цифрового двойника с компактным состоянием (порог риска – медиана риска по обучающей выборке)

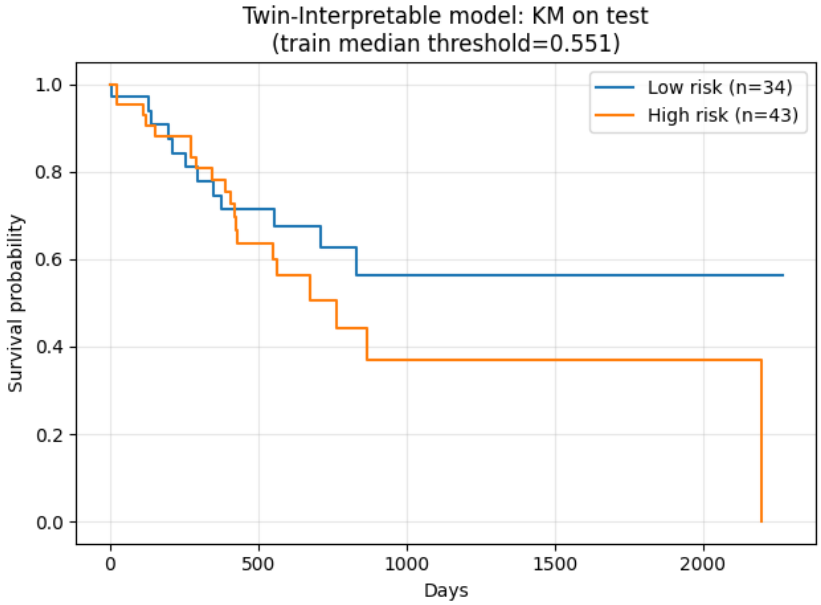


Рис. 7. Кривые Каплана – Майера на контрольной выборке: модель цифрового двойника с интерпретируемым состоянием (порог риска – медиана риска по обучающей выборке)

Интерпретируемое состояние на рисунке 7 обеспечивает менее устойчивое разделение групп риска, а p-значение 0,243 не подтверждает статистически различимую разницу на контрольной выборке. Причина ухудшения качества по сравнению с компактным состоянием связана с высокоразмерностью и коррелированностью генов: регуляризованная регрессия Кокса при большом числе признаков вынуждена «сжимать» коэффициенты, а добавление слабосвязанных с исходом генов увеличивает шум и снижает переносимость. Практические руководства по анализу выживаемости для омикс-данных подчеркивают, что отбор признаков и размерность представления часто оказываются важнее выбора «сложной» модели, а простые фильтры по вариативности и последующее сжатие признаков дают более устойчивые результаты, чем прямое использование тысяч генов [14].

Калибровка лучшей модели оценивается в таблице 5 на горизонтах 365 и 730 дней через сравнение средней предсказанной вероятности выживания и наблюдаемой вероятности, полученной по оценке Каплана – Майера в соответствующих группах предсказаний. Для горизонта 365 дней минимальное расхождение достигается в средних группах предсказаний (абсолютная ошибка 0,033–0,039), тогда как на нижнем интервале вероятностей заметно недооценивание выживаемости (0,574 против 0,720). Методические рекомендации по проверке прогностических моделей допускают оценку калибровки в фиксированный момент времени через сопоставление средней предсказанной выживаемости с наблюдаемой оценкой Каплана–Майера, что соответствует использованной процедуре [13].

Таблица 5

Калибровка лучшей модели (цифровой двойник с компактным состоянием)

Горизонт прогноза, дней	Интервал предсказанной вероятности выживания	Число пациентов	Средняя предсказанная вероятность	Наблюдаемая вероятность (оценка Каплана–Майера)	Абсолютное расхождение
365	(0,351; 0,678]	26	0,574	0,720	0,146
365	(0,678; 0,795]	25	0,745	0,778	0,033
365	(0,795; 0,921]	26	0,842	0,803	0,039
730	(0,0946; 0,418]	26	0,296	0,383	0,087
730	(0,418; 0,596]	25	0,516	0,569	0,053
730	(0,596; 0,83]	26	0,681	0,763	0,082

Таблица 6 описывает устойчивость оценок качества для лучшей модели по бутстрэп-повторам на контрольной выборке. Средний индекс Харрелла равен 0,628 при доверительном интервале 95% [0,523; 0,733], а средний индекс Уно равен 0,662 при доверительном интервале 95% [0,559; 0,767]; 300 из 300 повторов завершились успешно, что подтверждает численную устойчивость процедуры.

Таблица 6

Интервальная оценка качества лучшей модели (бутстрэп, 300 повторов)

Показатель	Среднее	Доверительный интервал 95%
Индекс согласия Харрелла	0,628	[0,523; 0,733]
Индекс согласия Уно с учетом цензурирования (τ=1132,3 дня)	0,662	[0,559; 0,767]
Число успешных бутстрэп-повторов	300 из 300	–

Выбор τ на уровне 0,9-квантили времени наблюдения обучающей выборки оправдан требованием положительной вероятности «нецензурирования» после τ, которое прямо фиксируется в описании функции concordance_index_ipcw [11].

Список литературы

1. Bray F., Laversanne M., Sung H. [и др.]. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // CA: A Cancer Journal for Clinicians. 2024. Vol. 74, № 3. P. 229–263. DOI: 10,3322/caac.21834.
2. Katsoulakis E., Wang Q., Wu H. [и др.]. Digital twins for health: a scoping review // npj Digital Medicine. 2024. Vol. 7. Art. 77. DOI: 10,1038/s41746-024-01073-0,
3. NCI Genomic Data Commons (GDC). GDC Data User's Guide. Текст: электронный. 2026. URL: https://docs.gdc.cancer.gov/Data/PDF/Data_UG.pdf (дата обращения: 02.03.2026).
4. Hartman N. Concordance Indices for Risk Scores With Policy Evaluations // Health Services Research. 2025. Vol. 60, № 6. e14619. DOI: 10,1111/1475-6773.14619.
5. National Cancer Institute. TCGA-STAD: Stomach Adenocarcinoma (проект данных). Текст: электронный // Genomic Data Commons Data Portal: [сайт]. URL: https://portal.gdc.cancer.gov/projects/TCGA-STAD (дата обращения: 02.03.2026).
6. National Cancer Institute. Bioinformatics Pipeline: mRNA Analysis. Текст: электронный // GDC Documentation: [сайт]. URL: https://docs.gdc.cancer.gov/Data/Bioinformatics_Pipelines/Expression_mRNA_Pipeline/ (дата обращения: 02.03.2026).
7. National Cancer Institute. Downloading Files. Текст: электронный // GDC API User's Guide: [сайт]. URL: https://docs.gdc.cancer.gov/API/Users_Guide/Downloading_Files/ (дата обращения: 02.03.2026).
8. National Cancer Institute. STAR-Counts. Текст: электронный // GDC Documentation: [сайт]. URL: https://docs.gdc.cancer.gov/Encyclopedia/pages/STAR_Counts/ (дата обращения: 02.03.2026).
9. Davidson-Pilon C. CoxPHFitter. Текст: электронный // lifelines documentation: [сайт]. URL: https://lifelines.readthedocs.io/en/latest/fitters/regression/CoxPHFitter.html (дата обращения: 02.03.2026).
10. scikit-survival. Evaluating Survival Models. Текст: электронный // scikit-survival documentation: [сайт]. 2025. URL: https://scikit-survival.readthedocs.io/en/latest/user_guide/evaluating-survival-models.html (дата обращения: 02.03.2026).
11. scikit-survival. sksurv.metrics.concordance_index_ipcw. Текст: электронный // scikit-survival documentation: [сайт]. 2025. URL: https://scikit-

survival.readthedocs.io/en/stable/api/generated/sksurv.metrics.concordance_index_ipcw.html (дата обращения: 02.03.2026).

12. lifelines. Statistical tests: logrank_test. Текст: электронный // lifelines documentation: [сайт]. 2025. URL: https://lifelines.readthedocs.io/en/latest/lifelines.statistics.html (дата обращения: 02.03.2026).

13. Efthimiou O., Seo M., Chalkou K. [и др.]. Developing clinical prediction models: a step-by-step guide // BMJ. 2024. Vol. 386. e078276. DOI: 10,1136/bmj-2023-078276.

14. Zhao Z., Zobolas J., Zucknick M. [и др.]. Tutorial on survival modeling with applications to omics data // Bioinformatics. 2024. Vol. 40, Issue 3. btae132. DOI: 10,1093/bioinformatics/btae132.

Колесенков А.Н.
д.т.н., профессор кафедры «Космические технологии»
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
Россия, Рязань
kt.rsreu@yandex.ru

ЦИФРОВОЙ ПАСПОРТ ИЗДЕЛИЯ КАК ЯДРО СКВОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦИИ

Аннотация. Статья посвящена комплексному исследованию цифрового паспорта изделия (ЦПИ) как стратегического инструмента сквозного управления жизненным циклом продукции в условиях масштабной цифровой трансформации современных промышленных предприятий. В работе проведен глубокий анализ текущего состояния отечественных и зарубежных проектов в таких высокотехнологичных отраслях, как авиастроение, энергетическое машиностроение и металлургия. В ходе исследования выявлены и структурированы критические системные противоречия между существующими фрагментарными реализациями информационных систем и современными требованиями к бесшовной семантической прослеживаемости данных на всех этапах – от проектирования до утилизации. Автором разработана и представлена оригинальная многоуровневая онтологическая модель ЦПИ, базирующаяся на семислойной архитектуре. Модель охватывает широкий спектр функциональных уровней: от первичной физической идентификации и технологической истории до метрологической прослеживаемости, прогностического моделирования и уровня принятия управленческих решений. Центральное место в исследовании занимает разработка архитектуры информационной системы поддержки ЦПИ, спроектированной как модульное, платформенно-независимое решение. Описана структура программного комплекса, включающая модуль семантической интеграции для работы с гетерогенными источниками данных, а также модуль вычисления взвешенного индекса полноты в режиме реального времени. Практическая значимость исследования заключается в создании методологической основы для перехода предприятий от реактивной модели контроля качества к проактивному управлению, основанному на объективных данных. Предложенные решения позволяют интегрировать гетерогенные потоки данных в единое информационное ядро, обеспечивая независимость знаний об изделии от конкретных программных платформ.

Ключевые слова: цифровой паспорт изделия, жизненный цикл продукции, управление качеством, цифровой двойник, сквозные цифровые технологии, событийно-ориентированная архитектура, целостность данных, промышленная цифровизация.

Kolesenkov A.N.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Space Technologies
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
Russia, Ryazan
kt.rsreu@yandex.ru

DIGITAL PRODUCT PASSPORT AS THE CORE OF END-TO-END PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT

Abstract. This article presents a comprehensive study of the digital product passport (DPP) as a strategic tool for end-to-end product lifecycle management in the context of large-scale digital transformation of modern industrial enterprises. The paper provides an in-depth analysis of the current state of domestic and international projects in high-tech industries such as aircraft manufacturing, power engineering, and metallurgy. This study identified and structured critical systemic contradictions between existing fragmented implementations of information systems and modern requirements for seamless semantic data traceability at all stages–from design to disposal. The author developed and presented an original multi-level ontological model of the DPP, based on a seven-layer architecture. The model covers a wide range of functional levels: from primary physical identification and technological history to metrological traceability, predictive modeling, and the level of management decision-making. The central focus of the study is the development of the architecture of the information system for supporting the DPP, designed as a modular, platform-independent solution. The structure of the software package is described, including a semantic integration module for working with heterogeneous data sources, as well as a module for calculating a weighted completeness index in real time. The practical significance of the study lies in the creation of a methodological basis for the transition of enterprises from a reactive quality control model to proactive management based on objective data. The proposed solutions enable the integration of heterogeneous data streams into a single information core, ensuring product knowledge is independent of specific software platforms.

Keywords: digital product passport, product lifecycle, quality management, digital twin, end-to-end digital technologies, event-driven architecture, data integrity, industrial digitalization.

Промышленность сегодня переживает не постепенную эволюцию, а структурный разрыв – переход от управления отдельными производственными операциями к управлению потоками данных, описывающих полный жизненный цикл (ЖЦ) изделия. Этот переход принципиально изменяет логику контроля качества: вместо дискретной проверки на контрольных точках возникает непрерывная верификация состояния объекта, которая охватывает конструирование, производство, эксплуатацию и утилизацию как единый управляемый процесс [1].

В данном контексте цифровой паспорт изделия (ЦПИ) превращается не просто в электронный аналог бумажной сопроводительной документации, а в семантически связанное информационное ядро, накапливающее и структурирующее данные обо всех событиях, воздействиях и состояниях объекта на протяжении его существования. Разница между «электронным документом» и «цифровым паспортом» примерно такая же, как между фотографией

человека и его медицинской картой с генетическим профилем, историей болезней и прогнозом состояния здоровья [2].

Актуальность настоящего исследования определяется несколькими взаимосвязанными факторами. Российские предприятия оборонно-промышленного комплекса, авиастроения и энергетического машиностроения в 2022–2025 годах оказались вынуждены форсированно реализовывать импортозамещение не только производственных компонентов, но и программных PLM-платформ (управление жизненным циклом изделий), на которых строилось управление данными об изделиях. Именно в таких условиях ЦПИ становится не технологическим излишеством, а критическим инфраструктурным элементом, обеспечивающим сохранность знаний об изделии вне зависимости от смены программной платформы.

Не менее существенен и международный контекст. Европейский союз с 2024 года ввел обязательный «цифровой паспорт продукта» в рамках Регламента об экодизайне для устойчивого развития, распространяя его на аккумуляторы, электронику, текстиль и строительные материалы. Таким образом, предприятия, экспортирующие или планирующие экспорт продукции на рынки ЕС и дружественных стран, следующих аналогичным регуляторным стандартам, оказываются перед прямой необходимостью создания ЦПИ как условия доступа к рынку.

Наконец, технологический фактор: массовое распространение промышленного интернета вещей, аддитивного производства, роботизированных систем контроля качества и технологий машинного обучения формирует объективные условия, при которых данные о состоянии изделия могут собираться автоматически, непрерывно и с беспрецедентной детализацией – но только при наличии стандартизированного контейнера для их хранения и структурирования, которым и является ЦПИ [3].

Несмотря на очевидную логику движения к сквозной цифровизации жизненного цикла изделий, практика реализации ЦПИ на российских предприятиях демонстрирует устойчивый набор системных дисфункций, препятствующих достижению декларируемого эффекта [4].

Ключевое противоречие настоящего исследования может быть сформулировано следующим образом: при наличии разрозненных инструментов сбора данных о жизненном цикле изделий и при декларируемом стремлении предприятий к цифровой трансформации отсутствует теоретически обоснованная и практически верифицированная модель ЦПИ, обеспечивающая семантическую связность данных на всех стадиях жизненного цикла и допускающая итерационное обогащение без потери структурной целостности.

Целью настоящей работы является разработка многоуровневой онтологической модели цифрового паспорта изделия, обеспечивающей сквозную прослеживаемость данных на всех стадиях жизненного цикла продукции, а также формализованного алгоритма верификации полноты и актуальности содержащихся в нём данных.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи. Первая состояла в систематизации и сравнительном анализе существующих подходов к формированию ЦПИ в российской и международной практике. Вторая предполагала разработку онтологической модели ЦПИ, охватывающей все функциональные слои жизненного цикла изделия. Третья задача заключалась в разработке модульной архитектуры информационной системы поддержки ЦПИ.

Информационная фрагментарность обусловлена тем, что данные об изделии формируются в различных корпоративных системах – CAD/CAM-средах, ERP-системах, системах технического обслуживания (ТОИР), лабораторных информационных системах (ЛИС), которые, как правило, не имеют стандартизированных интерфейсов обмена данными, вследствие чего при смене жизненного цикла изделия с одной стадии на другую часть данных безвозвратно теряется или остаётся в формате, недоступном для автоматической обработки [5].

Семантическая несвязность выражается в том, что даже при наличии нескольких баз данных, содержащих информацию об одном и том же изделии, одни и те же атрибуты обозначаются по-разному, используют различные единицы измерения, форматы дат и классификаторы, что делает автоматическую агрегацию данных практически невозможной без ручного нормирования.

Отсутствие механизмов верификации полноты проявляется в том, что в большинстве предприятий не существует формализованного критерия, позволяющего оценить, является ли ЦПИ на данном этапе жизненного цикла достаточно полным для принятия управленческих решений – будь то решение о допуске изделия к следующей стадии производства или о проведении внепланового технического обслуживания.

Недостаточная правовая и метрологическая прослеживаемость проявляется в отсутствии однозначной привязки данных ЦПИ к результатам метрологически аттестованных измерений, сертификатам соответствия, протоколам испытаний с указанием применённых средств измерений и их поверочных данных, что делает ЦПИ юридически уязвимым документом при предъявлении претензий в рамках гарантийных обязательств или требований регуляторов.

Европейский подход, формализованный в Регламенте ЕС 2024/1781, акцентирует внимание на экологических и социальных атрибутах жизненного цикла, прослеживаемости состава материалов и углеродного следа, оставляя в стороне технологическую и метрологическую составляющую, критически важную для промышленной продукции.

Российские разработки представлены прежде всего стандартами серии ГОСТ Р 57700, регламентирующими требования к цифровым двойникам, а также методологией ГОСТ Р 57193-2016, устанавливающей требования к

жизненному циклу систем. Ряд работ отечественных исследователей сформировал концептуальные основы управления данными жизненного цикла в российском промышленном контексте.

Тем не менее все перечисленные подходы объединяет общий изъян: они либо описывают структуру данных ЦПИ статически, не учитывая динамику изменения требований к полноте данных в зависимости от текущей стадии жизненного цикла, либо решают задачу верификации полноты данных качественно, без формализованного количественного критерия [6].

Разработка модели ЦПИ

Предлагаемая онтологическая модель ЦПИ построена по принципу слоистой архитектуры, где каждый вышележащий слой оперирует агрегированными данными нижележащих, обогащёнными семантическими связями (рис. 1). Модель включает семь функциональных слоёв, описание которых приведено ниже.

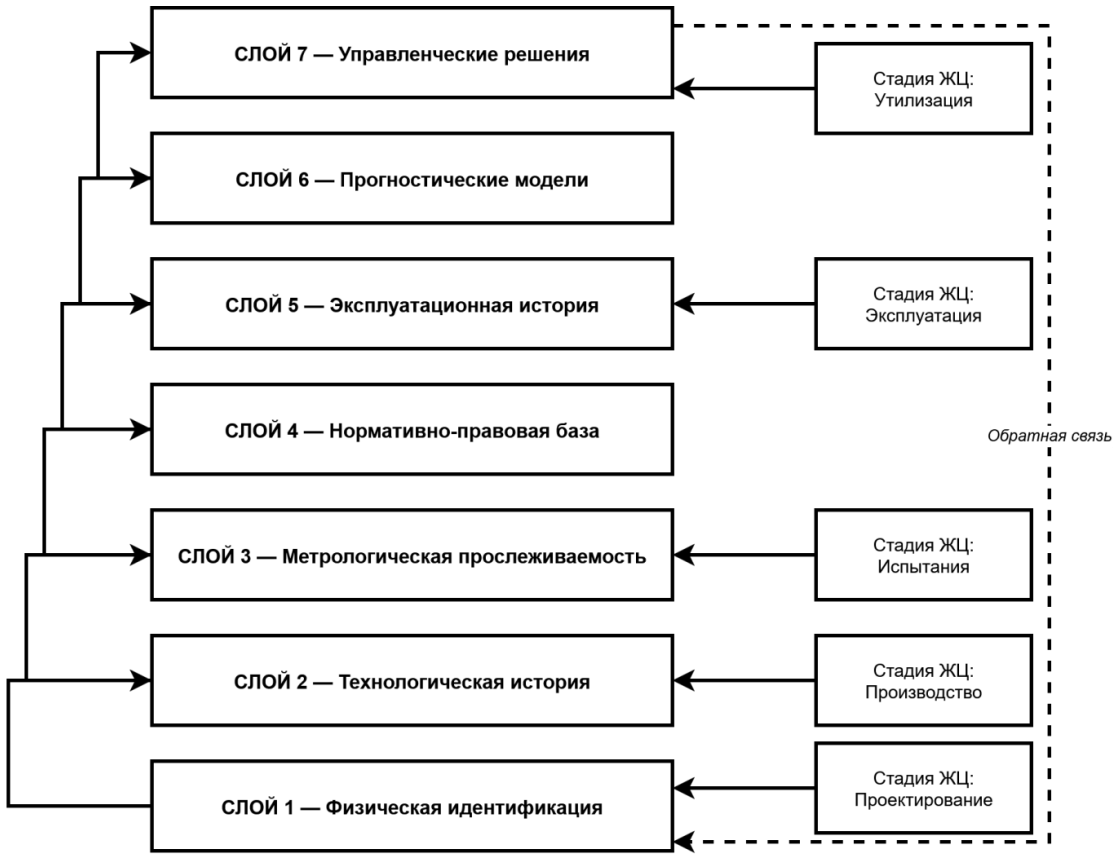


Рис. 1. Схема многоуровневой онтологической модели ЦПИ

Слой 1 – физическая идентификация – содержит уникальный идентификатор изделия (UID), его конструктивные и габаритные характеристики, состав материалов и покрытий с указанием нормативных документов на материалы.

Слой 2 – технологическая история – фиксирует данные о маршруте изготовления, применённом оборудовании, режимах обработки, параметрах

сварки, термообработки и других критических технологических операций с привязкой к конкретным производственным ресурсам и временным меткам.

Слой 3 – метрологическая прослеживаемость – обеспечивает хранение результатов всех измерений, проведённых в ходе производства и испытаний, с обязательным указанием применённых средств измерений, их поверочных свидетельств, неопределённости измерений и условий проведения.

Слой 4 – нормативно-правовая база – содержит ссылки на действующие технические регламенты, стандарты и конструкторские документы, на соответствие которым подтверждена продукция, с датами действия и историей версий нормативных документов.

Слой 5 – эксплуатационная история – накапливает данные о наработке, условиях эксплуатации (нагрузки, температуры, среда), зафиксированных отказах, проведённых ремонтах и заменах составных частей с указанием исполнителей и применённых запасных частей.

Слой 6 – прогностические модели – содержит параметры прогностических моделей технического состояния изделия, текущие прогнозы остаточного ресурса и рекомендованные сроки следующего технического обслуживания.

Слой 7 – управленческие решения – фиксирует принятые на основании данных ЦПИ управленческие решения с указанием их основания, исполнителя, срока реализации и результата, обеспечивая тем самым замкнутость петли управления жизненным циклом изделия.

Каждый слой модели описывается через набор классов, атрибутов и отношений. Для слоя 3 (метрологическая прослеживаемость) онтология включает следующие классы: «Измерение», «СредствоИзмерения», «Калибровка», «Результат», «НеопределённостьИзмерения». Отношение «проведено с использованием» связывает экземпляр класса «Измерение» с экземпляром класса «СредствоИзмерения»; отношение «имеет калибровку» связывает «СредствоИзмерения» с экземпляром класса «Калибровка», содержащим дату, место проведения и номер свидетельства о поверке.

Подобная структура обеспечивает возможность выполнения запросов вида: «найти все изделия, для которых измерение параметра X проводилось средством измерения Y, срок поверки которого истёк на момент измерения», что принципиально недостижимо при хранении данных в плоских файловых форматах.

Научная новизна представленной работы определяется тем, что разработана семислойная онтологическая модель ЦПИ, принципиально отличающаяся от известных функциональных моделей электронных паспортов изделий тем, что она включает не только описание физических и технологических характеристик объекта, но и формализованный слой управленческих решений, обеспечивающий прямую связь между техническим состоянием изделия и управляющими воздействиями, реализованными в ответ на зафиксированные отклонения.

Функциональные возможности системы

Архитектура информационной системы поддержки ЦПИ реализована в виде модулей, независимых от конкретной PLM-платформы и обеспечивающего следующие функциональные возможности (рис. 2).

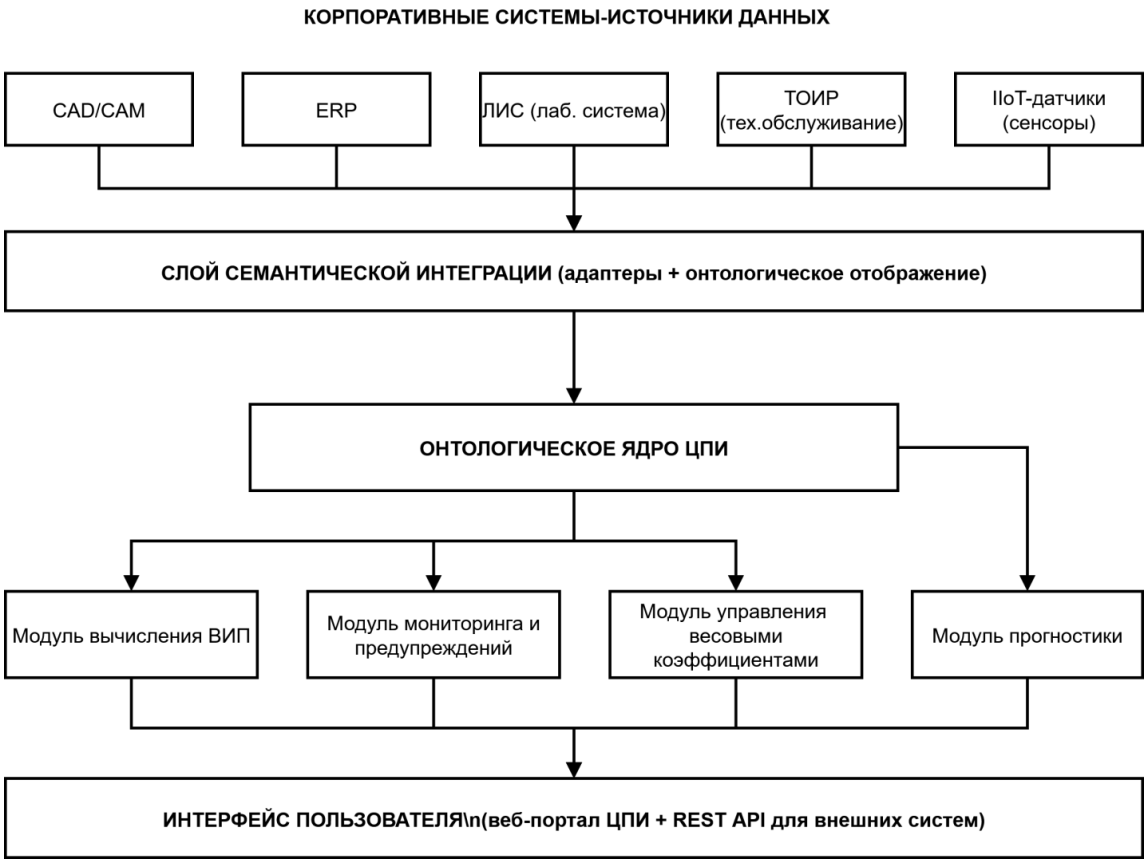


Рис. 2. Архитектура информационной системы поддержки ЦПИ

Модуль семантической интеграции обеспечивает сопоставление атрибутов ЦПИ с данными, хранящимися в гетерогенных корпоративных системах (CAD, ERP, ЛИС, ТОИР), через адаптеры, реализующие отображение онтологических классов на схемы баз данных конкретных систем.

Модуль вычисления и мониторинга взвешенного индекса полноты (ВИП) обеспечивает расчёт взвешенного индекса полноты в режиме реального времени с частотой обновления, а также формирование предупреждений при снижении ВИП ниже установленных пороговых значений.

Модуль управления весовыми коэффициентами предоставляет интерфейс для настройки весовых коэффициентов критичности атрибутов в зависимости от типа изделия, стадии жизненного цикла и требований конкретного заказчика.

Для предприятий машиностроительного профиля предложенная модель ЦПИ создаёт основу для перехода от реактивного управления качеством (выявление и устранение дефектов по факту их возникновения) к проактивному, опирающемуся на непрерывный мониторинг информационной полноты описания изделия как индикатора риска возникновения дефектов.

Для разработчиков PLM-платформ онтологическая модель ЦПИ представляет собой готовую семантическую схему, которая может быть реализована в виде расширения существующих информационных структур или служить основой для разработки специализированных модулей. Открытый характер онтологии обеспечивает её совместимость с существующими промышленными стандартами обмена данными.

Для органов стандартизации предложенные методика оценки зрелости ЦПИ и набор требований к минимально достаточному составу атрибутов для каждой стадии жизненного цикла могут служить основой для разработки стандарта, регламентирующего требования к составу и структуре ЦПИ промышленных изделий.

Проведённое исследование демонстрирует, что цифровой паспорт изделия, реализованный как семантически связанная многоуровневая онтологическая модель с формализованным механизмом верификации полноты данных, является не просто инструментом документирования, а системообразующим элементом сквозного управления жизненным циклом продукции, определяющим возможность перехода от ситуационного к предиктивному управлению качеством. Разработанная семислойная онтологическая модель обеспечивает полноту охвата жизненного цикла изделия от стадии технического задания до утилизации.

Список литературы

1. Кабанов, А. А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений / А. А. Кабанов, И. А. Федоров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 82. – С. 162–176. – DOI 10,21667/1995-4565-2022-82-162-176. – EDN TUYUQY.

2. Колесенков, А. Н. Информационная поддержка принятия решений в условиях неопределенности на промышленном производстве / А. Н. Колесенков, В. А. Слинкин // Новые информационные технологии в научных исследованиях : материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 16–18 ноября 2016 года / Рязанский государственный радиотехнический университет. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2016. – С. 301–302.

3. Forest fire monitoring by means of cyber-physical system / V. Ruchkin, V. Fulin, B. Kostrov [et al.] // 2016 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2016 – Including ECyPS 2016, BIOENG.MED 2016, MECO: Student Challenge 2016 : 5, Bar, 12–16 июня 2016 года. – Bar, 2016. – P. 30–34. – DOI 10,1109/MECO.2016.7525745.

4. Казаков, О. Д. Оценка эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства / О. Д. Казаков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 82. – С. 177–186. – DOI 10,21667/1995-4565-2022-82-177-186. – EDN BPZKKQ.

5. Колесенков, А. Н. Методологические основы интеграции цифровых двойников в учебный процесс подготовки инженерных кадров нового поколения / А. Н. Колесенков, Б. В. Костров // Цифровые трансформации в образовании (E-Digital Siberia'2025) : Мате-

риалы IX Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 23–24 апреля 2025 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2025. – С. 176–183.

6. Математическое моделирование процесса цифровизации экономических систем / Е. Н. Евдокимова, М. В. Куприянова, И. П. Соловьева, И. П. Симикова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2022. – № 81. – С. 65–71. – DOI 10,21667/1995-4565-2022-81-65-71. – EDN NLNTPT.

Решетов М.А.
аспирант
Московский авиационный институт
Россия, Москва
reshet0202@gmail.com

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОЦЕССОВ КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. В данной работе рассматривается значение цифровых двойников процессов для развития современной модели управления качеством. Актуальность темы определяется тем, что предприятия все чаще работают в условиях усложнения производственных и управленческих процессов, когда требования к скорости принятия решений и необходимости предупреждать отклонения до возникновения дефектов повышаются на постоянной основе. Цифровой двойник процесса рассматривается как динамическая информационная модель, которая связывает фактическое состояние процесса с цифровым следом, результатами моделирования, а также с прогнозными оценками. Такой подход позволяет расширить традиционное понимание качества с контроля готового результата к управлению процессом на основе данных. Цифровые двойники естественным образом вписываются в процессный подход, поддерживают рискориентированное мышление и делают прозрачным весь жизненный цикл продукта – от сырья до отгрузки. Благодаря им диагностика процессов становится предсказуемой, а значит, качество превращается в управляемый процесс на основе данных. В итоге предприятие получает реальный инструмент для экономии ресурсов, снижения издержек и повышения качества выпускаемой продукции. И, что важнее всего, – способность видеть проблемы заранее, ещё до того, как они стали дефектом.

Ключевые слова: цифровой двойник, управление качеством, процессный подход, цифровая трансформация, рискориентированное управление.

Reshetov M.A.
Postgraduate Student
Moscow Aviation Institute
Russia, Moscow
reshet0202@gmail.com

DIGITAL TWINS OF PROCESSES AS A TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF A MODERN QUALITY MANAGEMENT MODEL

Abstract. This article examines the significance of process digital twins for the development of modern quality management models. The relevance of the topic stems from the fact that

enterprises are increasingly operating under conditions of growing complexity in production and management processes, where the demands for decision-making speed and the need to prevent deviations before defects occur are continuously rising. A process digital twin is understood as a dynamic information model that links the actual state of the process with its digital footprint, simulation results, and predictive estimates. This approach allows the traditional understanding of quality to expand – shifting from the inspection of the final output to data-driven process management. Digital twins fit naturally into the process approach, support risk-based thinking, and make the entire product lifecycle – from raw materials to shipment – transparent. Thanks to them, process diagnostics become predictive, meaning that quality turns into a manageable, data-driven process. Ultimately, the enterprise gains a real tool for saving resources, reducing costs, and improving product quality. And most importantly – the ability to see problems in advance, before they turn into defects.

Keywords: digital twin, quality management, process approach, digital transformation, risk-based management.

Современная модель управления качеством все меньше похожа на систему, где качество проверяется только на выходе процесса. Для предприятия уже недостаточно зафиксировать дефект, оформить несоответствие и назначить корректирующее действие – такая логика сохраняет значение, но она является запаздывающей. На сложном производстве ошибка часто возникает задолго до того, как становится видимой в готовом результате, формально процесс еще идет, но качество будущего результата уже начинает снижаться. И именно в этих моментах цифровой двойник процесса становится полезным для управления качеством. Его не стоит понимать как схему, электронную копию регламента или очередную панель с показателями, которая усложняет процессы. Смысл цифрового двойника в том, что он связывает реальный процесс с его цифровым представлением, собирает данные о текущем состоянии, сопоставляет их с нормативными параметрами и помогает увидеть, куда процесс движется. В научной литературе цифровой двойник описывается как технология, способная отражать свойства объекта и их изменения в режиме реального времени, выявлять отклонения от нормативных значений и предупреждать риски. [1, 3, 5]

Обычная карта процесса отвечает на вопрос, как операция должна выполняться. В свою очередь, цифровой двойник показывает, что происходит фактически. Например, технологическая операция по документам занимает 20 минут, а в реальности при определенной загрузке оборудования растягивается до 35 минут или контрольная точка формально пройдена, но параметры входного материала несколько смен подряд находятся на границе допуска. В старой системе такие вещи часто замечают уже после брака или простоя, а цифровой двойник позволяет увидеть сдвиг раньше, если модель действительно связана с данными, а не существует отдельно от производства.

Цифровизация промышленности включает много разных технологий: интернет вещей, машинное обучение, роботизацию, аналитику больших данных, облачные решения и так далее. Но простое внедрение цифровых инструментов

само по себе не делает управление качеством современным. Предприятие может собирать большое количество показателей и все равно принимать решения вручную, с опозданием и по неполной картине. Попова и Никифоров указывают, что цифровой двойник относится к числу технологий, которые помогают анализировать состояние процессов и производственных мощностей на более детальном уровне. Однако для системы менеджмента качества принципиальна не сама цифровизация, а скорее способность той или иной системы превратить данные в управленческое действие. [3]

Цифровой двойник процесса полезен там, где есть повторяемость, измеримые параметры и понятная связь между ходом процесса и результатом. В классическом производстве применимость цифровых достаточно обширна – это может быть линия сборки, участок термообработки, испытательный стенд или процесс обслуживания оборудования. В управленческой деятельности – обработка заявки, закупка, согласование документации, логистика, сервисное обращение клиента. Разница между этими примерами техническая, но логика достаточно близка: нужно понимать, на каком этапе процесс теряет устойчивость и какие факторы чаще всего ведут к отклонению.

Процессный подход в управлении качеством требует рассматривать деятельность организации как цепочку взаимосвязанных процессов. На практике это часто превращается в классический набор документации, что не является эффективным в полной мере. Цифровой двойник добавляет к процессному подходу динамику, он позволяет увидеть не только структуру процесса, но и его поведение: где возникают задержки, какие операции дают нестабильный результат, как изменяется нагрузка, какие отклонения повторяются. Поэтому цифровой двойник можно рассматривать как способ оживить процессный подход, а также сделать его значительно менее «бумажным».

Для управления качеством особенно важна связь цифрового двойника с цифровым следом. К примеру, Фалеев разделяет цифровой двойник изделия и цифровой след жизненного цикла. Первый отражает оцифрованный проект, второй – накопленную историю конкретного изделия в процессе его существования. Это так же допустимо и по отношению к процессам. У процесса есть нормативная модель: маршрут, требования, контрольные точки, а также допустимые параметры. Помимо этого, есть и фактический след: кто выполнял операцию, сколько она заняла, какие данные поступили на вход, какие отклонения появились, чем закончился цикл. Когда эти два слоя сопоставляются друг с другом, качество становится наблюдаемым состоянием процесса. Подобный подход может быть полезен для предупреждения несоответствий, так как в классической системе контроля дефект часто обнаруживается поздно: изделие уже изготовлено, услуга оказана, клиент получил результат, документ ушел дальше по цепочке. Цифровой двойник дает шанс заметить ранние признаки дефекта, например: рост вибрации, увеличение времени операции, нестабильность температуры, частые ручные исправления, повторные обращения клиентов, отклонение маршрута согласования. Однако стоит заметить, что эти

признаки не всегда являются дефектами, но они показывают, что процесс теряет нормальный режим функционирования. [4]

В этом смысле цифровой двойник связан с рискориентированным подходом в управлении качеством, так как риск недостаточного качества перестает быть строкой в документации, которая обновляется перед ежегодным аудитом и начинает непосредственно проявляться в данных. Если модель показывает, что при определенном сочетании параметров растет вероятность брака или задержки, руководитель процесса получает повод вмешаться в процесс на более ранних этапах.

При работе с цифровыми двойниками есть опасность увлечься технологией и забыть, что качество не улучшается от одного факта моделирования. Это в своих работах отмечают Старожук и Яковлева – они отдельно выделяют риски внедрения цифровых двойников: нехватку квалифицированных специалистов, ошибки цифровых моделей и отсутствие единых методов их верификации. Если модель неверно описывает процесс, она не просто бесполезна, она может подвести к неправильному решению. Поэтому цифровой двойник сам должен стать объектом контроля. Его нужно проверять на фактических результатах: совпадают ли прогнозы с реальностью, не устарели ли параметры, корректно ли поступают данные, не изменилась ли технология. Это похоже на поверку измерительного инструмента, только инструментом здесь является сама модель. Если предприятие меняет какие-либо вводные к процессу, то цифровой двойник так же должен быть пересмотрен, в противном случае он начнет описывать прошлую версию процесса. [2]

Еще одним не менее важным вопросом является качество данных, которые поступают в цифровой двойник. На многих предприятиях данные уже есть, но они могут быть разрознены: часть в производственных системах, часть в Excel, часть в журналах контроля, часть в голове мастера или технолога. Для цифрового двойника это не может быть достаточным, так как нужна прослеживаемость: от входного параметра до результата, от операции до исполнителя, от отклонения до корректирующего действия. Без такой связки модель будет показывать отдельные фрагменты, а не процесс целиком.

Дополнительно, цифровой двойник хорошо раскрывается в управлении жизненным циклом продукции. На стадии проектирования он помогает проверять решения через виртуальные испытания. На стадии производства – отслеживать соблюдение режимов. А на стадии эксплуатации – накапливать сведения о поведении изделия в реальных условиях. В научных работах отмечается, что цифровые двойники на российских промышленных предприятиях применяются для виртуальных испытаний, прогнозирования поломок и повышения надежности продукции. Для качества это означает, что данные из эксплуатации могут возвращаться как в проектирование, так и в производство, не оставаясь в виде разрозненных отчетов. [6, 7]

Цифровой двойник применим и к бизнес-процессам, хотя здесь меньше датчиков и гораздо больше факторов организационного характера. Например, качество обработки клиентской заявки зависит от полноты первичных

данных, маршрута согласования, доступности ответственных сотрудников, корректности справочников, сроков передачи информации.

Цифровой двойник организации помогает увидеть влияние управленческих решений на процесс шире. Сокращение времени выполнения заказа может увеличить нагрузку на контроль, замена поставщика может снизить закупочную цену, но поднять риск нестабильности сырья, автоматизация одного участка может создать очередь на соседнем. Для качества выпускаемой продукции такие эффекты могут быть критичными: локальное улучшение не всегда улучшает систему, иногда оно просто переносит проблему в другое место. Но начинать сразу с цифрового двойника всей организации рискованно. На практике разумнее брать один процесс, где есть ощутимая проблема и доступные данные. Например, участок с повторяющимися дефектами, процесс с частыми задержками, оборудование с незапланированными простоями, клиентский контур с большим числом повторных обращений. На таком процессе проще проверить корректность работы модели и данных, а также оценить экономический эффект.

Внедрение цифрового двойника требует участия разных специалистов, так как компетенций в информационных технологиях недостаточно. Нужны технологи, владельцы процессов, специалисты по качеству, аналитики данных, инженеры и сотрудники эксплуатации. Если цифровой двойник создается только как ИТ-проект, он часто не доходит до управленческой практики. И если им в свою очередь занимаются только специалисты по качеству без понимания данных и моделей, возникает проблема с требованиями при отсутствующем цифровом контуре. Цифровой двойник не должен восприниматься персоналом как инструмент поиска виноватых. Если сотрудники видят в нем только усиленный контроль, они начинают защищаться: формально вводят данные, избегают фиксации проблем, переносят ответственность, и в этом случае модель быстро теряет достоверность.

Роль отдела по качеству не должна сохраняться только в роли проверяющей функции. Отдел по качеству должен участвовать в проектировании процессов, анализе данных, оценке рисков и выборе предупреждающих действий. Это гораздо ближе к реальным задачам предприятия, где нужно не просто обнаружить несоответствие, а сделать процесс более устойчивым. И в этом случае цифровой двойник здесь работает как инструмент профессионального анализа, а не как замена специалиста.

Цифровые двойники процессов способны развить систему управления качеством в сторону более раннего предупреждения проблем, лучшей прослеживаемости и более обоснованных решений. Но их нельзя внедрять как универсальное средство повышения эффективности. Такой подход слишком общий и часто заканчивается формальной цифровизацией, так как сначала должна быть понятная боль процесса, затем данные, потом модель, проверка модели и только после этого – включение цифрового двойника в управление.

В итоге, роль цифрового двойника процессов в контуре системы менеджмента качества состоит в том, что он переносит внимание с итогового контроля на условия формирования результата. Качество начинает рассматриваться как состояние процесса, которое можно наблюдать, прогнозировать и корректировать, а финальная отметка «соответствует/не соответствует» отходит на второй план.

Список литературы

1. Старожук Е.А. Анализ основных рисков снижения эффективности деятельности промышленных предприятий при внедрении цифровых двойников в автоматизированную систему управления жизненным циклом продукции / Е.А. Старожук, М.В. Яковлева // Вопросы инновационной экономики. – 2020, – Т. 10, № 3. – С. 1381–1392.
2. Попова, Е.В. Процесс цифровизации производства. Использование технологии цифровых двойников в промышленности / Е. В. Попова, Д. И. Никифоров // Экономика строительства. – 2020, – № 4 (64). – С. 52–58.
3. Фалеев С.П. Цифровой двойник изделия и цифровой след жизненного цикла изделия в качестве информационных моделей для системного анализа и технической диагностики / С.П. Фалеев. – 2023. – С. 47–57.
4. Мугутдинов Р.М. Особенности цифровой трансформации в промышленности / Р.М. Мугутдинов, А.А. Горовой // Вестник Академии знаний. – 2022. – № 48 (1). – С. 216–226.
5. Таюрская И.С. Теоретические и практические аспекты создания цифрового двойника организации / И.С. Таюрская // Экономика и управление. – 2025. – Т. 31, № 4. – С. 430–441.
6. Гостева О.В. Особенности применения цифровых двойников на российских промышленных предприятиях / О.В. Гостева, О.В. Пацук // Менеджмент / Management. – 2023. – С. 1–4.

Бурдули В.В.
студент
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, Калининград
v1burdul1@gmail.com
Малышко А.О.
студент
Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта
Россия, Калининград
anna.malyshk@yandex.ru

ЦИФРОВЫЕ РЕШЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ СКВАЖИНАМИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема ручного сбора и обработки технологических данных при эксплуатации скважин и газораспределительных пунктов (ГРП) подземных хранилищ газа (ПХГ). Показано, что традиционный подход, основан-

ный на ведении бумажных журналов и суточных рапортов, приводит к высоким трудозатратам, ошибкам ввода данных и снижению оперативности принятия управленческих решений в случай аварийных ситуаций. Цель работы – разработка и обоснование веб-приложения «УПОС – ПХГ», предназначенного для автоматизации процессов сбора, хранения, статистического анализа и визуализации эксплуатационных параметров скважин подземных хранилищ газа. Программа реализована на современном технологическом стеке и полностью соответствует требованиям действующей нормативной базы. В рамках исследования проведён анализ структуры эксплуатационных данных, выполнена их нормализация, обоснована архитектура программного комплекса и проведена апробация статистической обработки реальных суточных рапортов. Полученные результаты дают подтверждение тому, что внедрение предложенного цифрового решения позволяет существенно сократить время обработки данных, минимизировать ошибки и повысить эффективность контроля технологических режимов. Разработанная система может быть рекомендована для практического применения на объектах подземных хранилищ газа как в России, так и зарубежных странах.

Ключевые слова: подземные хранилища газа, управление скважинами, автоматизация учёта, статистический анализ, веб-приложение, суточные рапорты, цифровая платформа.

Burduli V.V.
Student
Immanuel Kant Baltic Federal University
Russia, Kaliningrad
v1burdul1@gmail.com
Malyshko A.O.
Student
Immanuel Kant Baltic Federal University
Russia, Kaliningrad
anna.malyshk@yandex.ru

QUALITY ASSURANCE PROBLEMS OF FIELD PIPELINE SYSTEMS MADE OF POLYMER REINFORCED PIPES

Abstract. The article addresses the pressing issue of manual collection and processing of technological data during the operation of wells and gas distribution points (GRP) at underground gas storage facilities. It is shown that the traditional approach based on paper journals and daily reports leads to high labor costs, data entry errors, and reduced speed of management decision-making.

Keywords: underground gas storage, well management, accounting automation, statistical analysis, web application, daily reports, digital platform.

Подземные хранилища газа (ПХГ) играют стратегическую роль в обеспечении энергетической безопасности и регулировании сезонной неравномерности потребления природного газа. Большинство действующих хранилищ в России и странах СНГ создано на базе истощённых газовых месторождений. Эффективное управление такими объектами требует постоянного контроля ключевых технологических параметров скважин и газораспределительных пунктов (ГРП): давления, температуры, дебита газа, объёма выноса воды и породы [1, 2].

В настоящее время на большинстве объектов ПХГ сбор и первичная обработка эксплуатационных данных осуществляются вручную – через суточные рапорты операторов и журналы учёта. Такой подход, несмотря на нормативную регламентацию, приводит к значительным трудозатратам, высокому риску ошибок при переносе информации, задержкам в формировании аналитических отчётов и снижению оперативности принятия управленческих решений [2, 3].

Актуальность проблемы усиливается ростом объёма данных при сезонной эксплуатации хранилищ, когда ежедневно формируются массивы информации по десяткам скважин и нескольким ГРП. В этих условиях традиционные методы обработки становятся недостаточно эффективными для оперативного мониторинга режимов закачки и отбора газа, прогнозирования отклонений и планирования профилактического обслуживания [4].

Цель данной работы обоснование актуальности цифровой платформы «УПОС – ПХГ», обеспечивающей автоматизацию сбора, хранения, статистического анализа и визуализации данных эксплуатации скважин подземных хранилищ газа с возможностью оперативного выявления аномалий технологических режимов.

Методология исследования носит комплексный характер и включает несколько взаимосвязанных этапов.

На первом этапе проведён анализ нормативно-технической базы и структуры эксплуатационных данных суточных рапортов ГРП, включая требования к составу и периодичности регистрации параметров [5]. На втором этапе выполнена группировка параметров по уровням (обобщённые показатели ГРП и индивидуальные характеристики скважин), а также их нормализация с использованием min-max масштабирования для приведения разнородных величин к единому безразмерному диапазону [6,7].

Третий этап посвящён обоснованию архитектуры программного комплекса и выбору технологического стека, обеспечивающего мобильность, многопользовательский доступ и высокую производительность обработки больших массивов данных. На заключительном этапе проведена апробация разработанного веб-приложения путём статистической обработки типовых суточных рапортов с построением трендов изменения ключевых параметров (дебит, давление, температура) и расчётом статистических показателей (среднее, минимум, максимум) [8].

Таким образом, методология сочетает нормативный анализ, математическую обработку данных и практическую апробацию программного решения на типовых эксплуатационных массивах.

В рамках реализации разработано веб-приложение «УПОС – ПХГ», предназначенное для автоматизированного управления процессом обслуживания скважин подземных хранилищ газа. Программа построена на технологическом стеке Python + Flask + SQLite + Pandas + OpenPyXL и обеспе-

чивает полный цикл работы с эксплуатационными данными: от ввода суточных рапортов операторами до статистической обработки и визуализации динамики параметров [9].

Алгоритм функционирования системы включает два основных модуля. Первый модуль отвечает за ввод и агрегацию данных. Оператор заполняет обобщённые параметры ГРП и индивидуальные характеристики каждой скважины (до 36 позиций). Система выполняет автоматическую валидацию вводимых значений и сохраняет данные в реляционную базу. Второй модуль реализует статистический анализ: по выбранному ГРП и периоду рассчитываются средние, минимальные и максимальные значения ключевых параметров (дебит газа, давление на устье, температура устья, время работы), а также строятся тренды их изменения во времени [10].

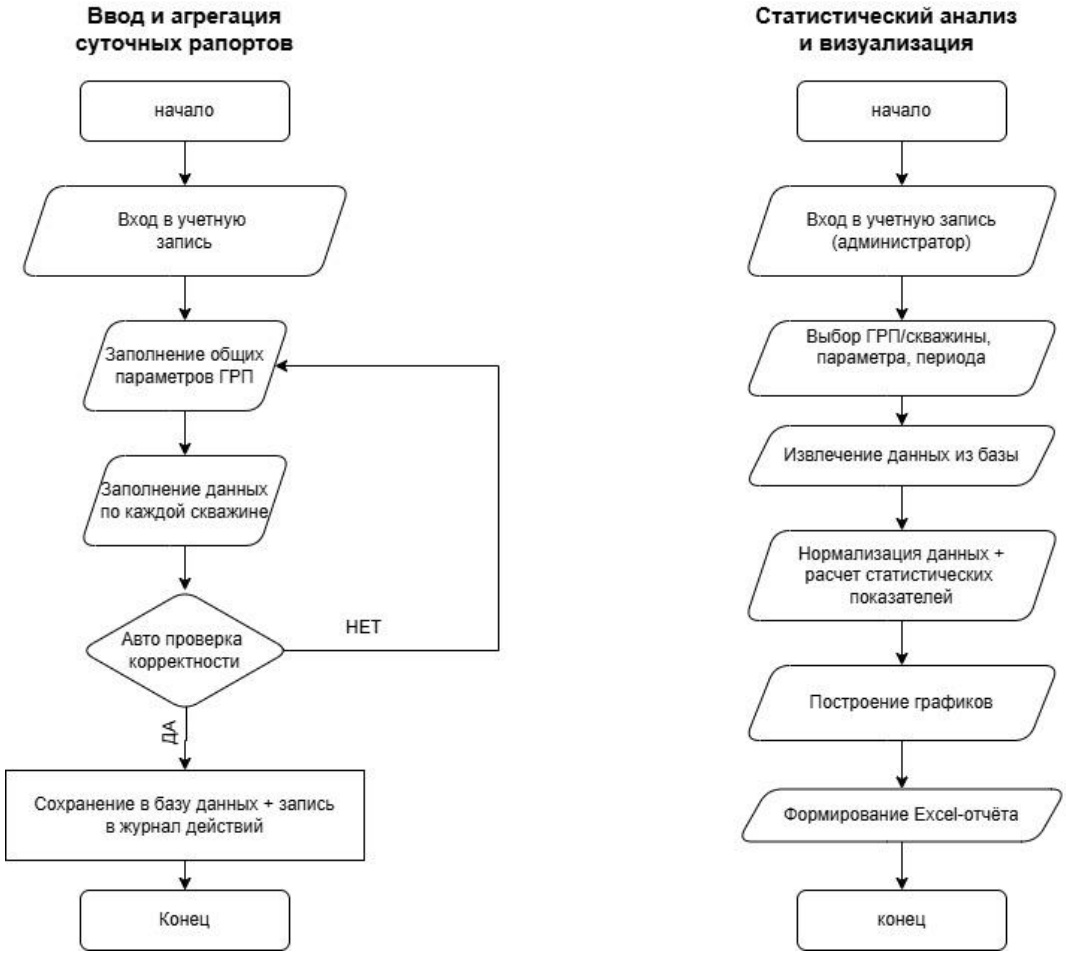


Рис. Блок-схемы алгоритма программы «УПОС – ПХГ»: а – ввод и агрегация суточных рапортов; б – статистический анализ и визуализация динамики параметров

Проверка программы проводилась на типовых данных, структура которых соответствует реальным суточным рапортам эксплуатации ГРП. Результаты статистической обработки показали высокую сходимость с ручными расчётами в Excel при значительном сокращении времени анализа [9,10].

Таким образом, разработанное решение обеспечивает оперативный мониторинг технологических режимов, автоматическое формирование аналитических отчётов и возможность своевременной корректировки режимов закачки и отбора газа.

Список литературы

1. Михайловский А. А. Стадии, этапы и периоды в жизненном цикле подземных хранилищ газа // Вести газовой науки. – 2025. – № 1 (61). – С. 57–65.
2. Гарайшин А. С., Хан С. А., Ковалёв А. А. Основные проблемы и пути решения интеллектуализации подземных хранилищ газа в России // Вести газовой науки. – 2015. – № 3. – С. 73–78.
3. Керимов А. Г., Зенин Д. И., Керимова Е. Г., Теленько Д. С. Применение технологии «интеллектуальная скважина» для контроля эксплуатации подземного хранилища газа // Наука. Инновации. Технологии. – 2016. – № 4. – С. 153–160,
4. Щербань, П. С. Оценка современного состояния газотранспортной системы Калининградской области и перспективы дальнейшей газификации / П. С. Щербань, Е. А. Латышева // Транспорт и сервис. – 2018. – № 6. – С. 88–100, – EDN XORCBF.
5. Zhang Y., Li J., Wang X. et al. Advanced monitoring and simulation for underground gas storage risk management // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 208. – P. 109–124. DOI: 10,1016/j.petrol.2021.109124.
6. Щербань, П. С. Использование метода коммивояжера в разработке компьютерной программы по обслуживанию газораспределительных станций / П. С. Щербань, А. В. Хохлова, В. В. Голованов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2018. – № 1. – С. 40–45. – EDN YLIYBY.
7. Лаптев В. В., Орлов П. А., Драгунова О. В. Визуализация динамических структур данных с помощью потоковых диаграмм в веб-аналитике // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2017. – Т. 10, – № 4. – С. 7–16.
8. Ерин Н. С., Холоша Д. В. Выбор типа подземного хранилища газа на территории Российской Федерации // Научный форум. – 2023. – № 4. – С. 16–25.
9. Digital Twin-Enabled Automated Well Management and Flow Advisory for Underground Gas Storage (UGS) Systems // SPE Annual Caspian Technical Conference. – 2025. – SPE-230335-MS.
10. Кульчицкий В. В. Супервайзинг строительства нефтяных и газовых скважин. – М.: Вече, 2019. – 368 с.

Кайкова И.В.
аспирант
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
kaikova03@mail.ru
Елисеева Н.В.
к.т.н., доцент кафедры УИТС
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
n.eliseeva@stankin.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Аннотация. В современной экономике, характеризующейся стремительной цифровой трансформацией всех отраслей промышленности, вопросы оценки готовности предприятий к внедрению цифровых технологий приобретают особую актуальность. Настоящая статья посвящена проблеме математического моделирования уровня цифровой зрелости как ключевого инструмента повышения эффективности процессов управления качеством. Авторами предлагается подход, базирующийся на многокритериальной оценке, позволяющей не только диагностировать текущее состояние предприятия, но и прогнозировать траектории его дальнейшего развития в контексте цифровизации. Особое внимание уделяется взаимосвязи между уровнем цифровой зрелости и качеством управленческих решений, принимаемых на различных уровнях иерархии предприятия. В работе показано, что внедрение математических моделей оценки цифровой зрелости создает методологическую основу для трансформации систем менеджмента качества в направлении их большей адаптивности, прогностичности и эффективности.

Ключевые слова: математическое моделирование, цифровая зрелость, управление качеством, цифровая трансформация, многокритериальная оценка, принятие решений.

Kaykova I.V.
Postgraduate Student
Moscow State University of Technology «STANKIN»
Russia, Moscow
kaikova03@mail.ru
Eliseeva N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Control and Information-Technical Systems
Moscow State University of Technology «STANKIN»
Russia, Moscow
n.eliseeva@stankin.ru

MATHEMATICAL MODELING OF DIGITAL MATURITY LEVEL AS A TOOL FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF QUALITY MANAGEMENT PROCESSES

Abstract. In the modern economy, characterized by the rapid digital transformation of all industrial sectors, the issues of assessing the readiness of enterprises to implement digital technologies are becoming particularly relevant. This article is devoted to the problem of

mathematical modeling of the digital maturity level as a key tool for improving the efficiency of quality management processes. The authors propose an approach based on multi-criteria assessment, which allows not only to diagnose the current state of an enterprise but also to predict the trajectories of its further development in the context of digitalization. Special attention is paid to the relationship between the level of digital maturity and the quality of managerial decisions made at various levels of the enterprise hierarchy. The paper demonstrates that the implementation of mathematical models for assessing digital maturity creates a methodological basis for the transformation of quality management systems towards greater adaptability, predictability, and efficiency.

Keywords: mathematical modeling, digital maturity, quality management, digital transformation, multi-criteria assessment, decision-making.

В условиях четвертой промышленной революции, когда цифровые технологии проникают во все сферы производственной и управленческой деятельности, проблема оценки готовности предприятий к цифровой трансформации выходит на первый план. Управление качеством, традиционно опиравшееся на статистические методы контроля и стандартизированные процедуры, сегодня сталкивается с необходимостью кардинальной перестройки своих подходов. Цифровизация процессов управления качеством означает не просто автоматизацию существующих операций, но и переосмысление самой философии качества в контексте больших данных, предиктивной аналитики и интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является математическое моделирование уровня цифровой зрелости предприятия. Цифровая зрелость представляет собой интегральную характеристику, отражающую способность организации эффективно использовать цифровые технологии для достижения своих стратегических целей, включая цели в области качества. Однако вопрос о том, как количественно измерить эту способность и как связать ее с реальными показателями качества продукции и процессов, остается открытым и требует дальнейших теоретических и прикладных исследований.

Целью настоящей работы является разработка концептуальных основ математического моделирования уровня цифровой зрелости как инструмента повышения эффективности процессов управления качеством. В отличие от существующих подходов, авторы фокусируются не столько на технических аспектах цифровизации, сколько на организационно-управленческих факторах, определяющих успех цифровой трансформации систем качества.

Теоретические предпосылки исследования

Традиционные системы менеджмента качества, построенные на принципах всеобщего управления качеством (TQM), изначально не были ориентированы на цифровую среду. Документоориентированный подход, преобладавший в эпоху бумажных регламентов, сегодня вступает в противоречие с требованиями оперативности, прозрачности и прослеживаемости, которые

предъявляет цифровая экономика. Переход к цифровому управлению качеством требует не только замены бумажных носителей электронными, но и фундаментальной перестройки информационных потоков, процедур контроля и механизмов обратной связи.

Процессы цифровой трансформации носят комплексный, междисциплинарный характер. Они затрагивают одновременно технологическую, организационную, кадровую и культурную сферы деятельности предприятия. Соответственно, и оценка цифровой зрелости не может быть сведена к измерению лишь одного какого-либо аспекта, например, степени автоматизации производственных линий или количества внедренных информационных систем. Необходим многомерный подход, учитывающий различные структурные области предприятия и их взаимное влияние друг на друга.

Управление качеством в цифровую эпоху все больше смещается от реактивной модели (обнаружение и исправление дефектов) к предиктивной (предотвращение дефектов на основе анализа данных). Это требует от систем качества способности обрабатывать большие объемы разнородной информации в реальном времени, выявлять скрытые закономерности и формировать прогнозные оценки. Математическое моделирование цифровой зрелости должно обеспечивать такую возможность, выступая в роли связующего звена между сырыми данными о деятельности предприятия и стратегическими решениями в области качества.

Концептуальная модель взаимосвязи цифровой зрелости и качества

В рамках данного исследования предлагается рассматривать цифровую зрелость не как самоцель, а как средство достижения более высокого уровня качества процессов и продукции. Иными словами, инвестиции в цифровизацию должны оцениваться не столько по количеству внедренных технологий, сколько по их влиянию на ключевые показатели качества.

Для описания этой взаимосвязи в работе вводится понятие «цифрового качества» – интегральной характеристики, отражающей способность цифровых инструментов и методов обеспечивать требуемый уровень удовлетворенности потребителей, соответствия установленным требованиям и эффективности процессов. Цифровое качество не заменяет традиционное понимание качества, а дополняет его новыми измерениями, такими как скорость обработки информации, точность прогнозов, степень автоматизации контроля и адаптивность к изменениям.

Математическое моделирование уровня цифровой зрелости, с этой точки зрения, выполняет две основные функции. Диагностическая функция –модель позволяет определить, насколько текущее состояние цифровизации предприятия соответствует требованиям современного управления качеством. Прогностическая функция – на основе полученных оценок можно смоделировать, как изменения в отдельных компонентах цифровой зрелости (например, повышение квалификации персонала или внедрение новой информационной системы) повлияют на итоговые показатели качества.

Авторский подход к математическому моделированию строится на нескольких базовых принципах:

Первый принцип – многокритериальность, означающая, что цифровая зрелость оценивается по совокупности разнородных показателей, каждый из которых отражает определенный аспект готовности предприятия к цифровой трансформации управления качеством.

Второй принцип – иерархичность, предполагающая, что частные показатели последовательно агрегируются в интегральные индексы, что позволяет анализировать ситуацию с разной степенью детализации.

Третий принцип – адаптивность, заключающийся в возможности настройки весовых коэффициентов и состава показателей с учетом отраслевой специфики и стратегических приоритетов конкретного предприятия.

Методологические аспекты оценки цифровой зрелости

Переходя к практической реализации описанных выше принципов, необходимо отметить, что процесс математического моделирования уровня цифровой зрелости включает несколько последовательных этапов, каждый из которых имеет самостоятельное значение для управления качеством.

Первый этап связан со сбором и первичной обработкой данных. Источниками информации служат как формализованные документы (цифровой паспорт предприятия), так и экспертные оценки специалистов в области качества и цифровизации. Важной особенностью предлагаемого подхода является то, что он не ограничивается исключительно количественными метриками, но учитывает также качественные характеристики, которые могут быть выражены в балльной форме. Это особенно актуально для таких аспектов цифровой зрелости, как организационная культура, компетенции персонала или стиль управления, которые трудно поддаются прямой численной оценке.

Второй этап связан с определением весовых коэффициентов. Не все показатели и области вносят одинаковый вклад в итоговую цифровую зрелость и, соответственно, в эффективность управления качеством. Некоторые характеристики имеют приоритетное значение (например, наличие системы управления качеством на основе больших данных), другие – вспомогательное. В предлагаемой модели весовые коэффициенты определяются экспертным путем, но с использованием математических методов, позволяющих формализовать экспертные суждения и оценить степень их согласованности. Это снижает риск субъективизма и повышает воспроизводимость результатов.

Третий этап – агрегация и расчет итогового индекса. Именно на этом этапе математический аппарат проявляет свои ключевые особенности. В отличие от многих существующих моделей, которые ограничиваются простым суммированием или усреднением оценок, авторский подход использует комбинированные методы агрегации. Один из методов позволяет получить так называемую «неполную» оценку, отражающую средний уровень зрелости без учета неравномерности развития различных областей. Другой метод – «полная» оценка, которая, напротив, чувствительна к дисбалансу и

штрафует предприятия, где одни области цифровизации находятся на высоком уровне, а другие – на низком. С точки зрения управления качеством, вторая оценка часто более информативна, поскольку успех цифровой трансформации в конечном счете определяется не отдельными достижениями, а целостностью системы.

Четвертый, заключительный этап – интерпретация результатов и формирование рекомендаций. Полученное числовое значение индекса цифровой зрелости само по себе не является конечной целью. Важно понимать, что означает та или иная оценка для практики управления качеством, какие действия следует предпринять при обнаружении отклонений и как отслеживать динамику изменений. В рамках предлагаемой модели разработана система интерпретационных шкал и типовых сценариев, позволяющих перейти от абстрактных чисел к конкретным управленческим решениям.

Применение модели в процессах управления качеством

На операционном уровне модель позволяет осуществлять мониторинг ключевых показателей качества в режиме, приближенном к реальному времени. Традиционные системы контроля качества часто страдают от запаздывания информации, так как дефект может быть обнаружен не сразу после его возникновения, что ведет к росту несоответствий и увеличению затрат на переделку. Цифровое качество, основанное на высоком уровне зрелости, предполагает использование сенсоров, систем технического зрения и предиктивной аналитики для непрерывного отслеживания параметров процессов. Математическая модель цифровой зрелости помогает оценить, насколько предприятие готово к внедрению таких инструментов, и выявить узкие места, препятствующие переходу к проактивному управлению качеством.

На тактическом уровне модель становится инструментом бенчмаркинга и сравнительного анализа. Руководство предприятия может сопоставлять показатели цифровой зрелости различных цехов, производственных линий или дочерних обществ, выявляя лучшие практики и тиражируя их. Более того, возможно сравнение с предприятиями-конкурентами или отраслевыми лидерами, что позволяет ставить реалистичные цели по цифровой трансформации систем качества. Важно подчеркнуть, что такое сравнение имеет смысл только при условии сопоставимости исходных данных и унификации методики расчета – именно это обеспечивается применением формализованного математического аппарата.

На стратегическом уровне модель служит основой для долгосрочного планирования и распределения ресурсов. Инвестиции в цифровизацию управления качеством, как правило, требуют значительных затрат, а их отдача может быть отсроченной. Математическое моделирование позволяет оценить, какие направления цифровой трансформации дадут максимальный прирост качества в расчете на вложенный рубль, а также спрогнозировать динамику изменения индекса цифровой зрелости при различных сценариях

финансирования и организационных изменений. Это превращает управление качеством из области интуитивных решений в область обоснованного выбора, опирающегося на количественные оценки.

Особого внимания заслуживает вопрос о роли человеческого фактора. Нередко на предприятиях складывается ситуация, когда технологическая инфраструктура уже готова к цифровизации управления качеством, но персонал – от операторов до руководителей – не обладает необходимыми компетенциями или не мотивирован к изменениям. Математическая модель цифровой зрелости включает специальные блоки, оценивающие кадровые и культурные аспекты, что позволяет своевременно выявить этот разрыв и скорректировать программу цифровой трансформации, сделав акцент на обучении и организационном развитии, а не только на закупке оборудования и программного обеспечения.

В настоящей статье рассмотрены теоретические и прикладные аспекты математического моделирования уровня цифровой зрелости как инструмента повышения эффективности процессов управления качеством. Показано, что традиционные подходы к управлению качеством, сложившиеся в доцифровую эпоху, нуждаются в серьезной трансформации, и одним из ключевых элементов этой трансформации является создание надежного количественного инструментария для оценки готовности предприятий к внедрению цифровых технологий в сферу качества.

Предлагаемый авторский подход базируется на принципах многокритериальности, иерархичности и адаптивности, что позволяет учитывать разнородные аспекты цифровой зрелости – от технологической инфраструктуры до организационной культуры и компетенций персонала. Особенностью подхода является различение «неполной» и «полной» оценок, что дает возможность анализировать не только средний уровень цифровизации, но и степень равномерности развития различных областей.

Практическая значимость работы заключается в том, что созданный математический аппарат может быть использован промышленными предприятиями для диагностики текущего состояния, выбора приоритетных направлений цифровой трансформации управления качеством, мониторинга прогресса и обоснования инвестиционных решений.

Математическое моделирование цифровой зрелости может в полной мере реализовать свой потенциал как инструмент повышения эффективности управления качеством в эпоху цифровой экономики.

Список литературы

1. Попов Е.В. Уровни цифровой зрелости промышленного предприятия / Е.В. Попов, В.Л. Симонова, В.В. Черепанов // Journal of New Economy. 2021. Т. 22, № 2. С. 89–109.

2. Гилева Т.А. Цифровая зрелость предприятия: методы оценки и управления // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия «Экономика». 2021. № 1 (27). С. 38–52.

3. Глезман Л.В. Приоритеты пространственно-отраслевого развития регионов в условиях цифровизации экономики // Вопросы инновационной экономики. 2021. Т. 11, № 2. С. 581–596. DOI: 10,18334/vinec.11.2.111961.

4. Хохлов Ю.Е. Готовность регионов России к информационному обществу // Информационное общество. 2006. № 4. С. 20–22.

5. Лепеш Г.В. Цифровая трансформация промышленного сектора экономики // Технико-технологические проблемы сервиса. 2022. Т. 60, № 2. С. 3–15.

6. Кайкова И.В. Цифровая культура как ключевой фактор цифровой зрелости // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сборник статей по материалам CI международной научно-практической конференции. № 5(93). Новосибирск: СибАК, 2024. С. 45–52.

7. Кайкова И.В. Стандарты цифровой зрелости: анализ и перспективы // Научный аспект. 2024. № 5.

Денисенко Д.А.
студент
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
denisenkoDmitryA@gmail.com
Елисеева Н.В.
к.т.н., доцент кафедры УИТС
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
n.eliseeva@stankin.ru

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ AI-СИСТЕМ В КОНТЕКСТЕ MLOPS И ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. В работе рассматриваются актуальные вопросы разработки и эксплуатации многоагентных систем искусственного интеллекта в контексте методологии MLOps и облачных технологий. Актуальность темы определяется быстрым распространением агентных решений на основе больших языковых моделей в промышленности и одновременным отсутствием устоявшихся инженерных практик их сопровождения. Описана типовая архитектура мультиагентной системы на основе больших языковых моделей, включающая агента-планировщика, специализированных исполнителей, агента-критика и слой оркестрации. Проанализированы ключевые проблемы промышленной эксплуатации таких систем: недетерминированность поведения, рост стоимости инференса, сложность отладки и обеспечения воспроизводимости. Предложен расширенный MLOps-конвейер, учитывающий специфику мультиагентных систем: версионирование промптов и инструментов, оценку качества цепочек рассуждений, мониторинг семантического дрейфа и контроль расходов на API внешних моделей. Рассмотрены преимущества облачной инфраструктуры (Kubernetes, бессерверные вычисления, объектные хранилища) при развёртывании агентных систем. Представлен гипотетический промышленный кейс – мультиагентная система контроля качества продукции металлообрабатывающего предприятия, объединяющая агентов компьютерного зрения, анализа протоколов измерений и генерации отчётов. Показано, что грамотная интеграция мультиагентных AI-систем с практиками MLOps и облачной инфраструктурой обеспечивает требуемый уровень

надёжности, наблюдаемости и управляемости стоимостью при сохранении высокой гибкости решений и совместимости с требованиями национальных стандартов в области доверия к системам искусственного интеллекта.

Ключевые слова: многоагентные системы, искусственный интеллект, MLOps, облачные технологии, большие языковые модели, оркестрация агентов, управление качеством, цифровизация.

Denisenko D.A.
Student
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
denisenkoDmitryA@gmail.com
Eliseeva N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of MITS
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
n.eliseeva@stankin.ru

DEVELOPMENT AND OPERATION OF MULTI-AGENT AI SYSTEMS IN THE CONTEXT OF MLOPS AND CLOUD TECHNOLOGIES

Annotation. The paper addresses current issues of developing and operating multi-agent artificial intelligence systems in the context of MLOps methodology and cloud technologies. A typical architecture of a multi-agent system based on large language models is described, including a planner agent, specialized executor agents, a critic agent, and an orchestration layer. Key challenges of industrial operation of such systems are analyzed: non-determinism of behavior, growing inference cost, complexity of debugging, and ensuring reproducibility. An extended MLOps pipeline is proposed that takes into account the specifics of multi-agent systems: versioning of prompts and tools, evaluation of reasoning chain quality, semantic drift monitoring, and cost control for external model APIs. The advantages of cloud infrastructure (Kubernetes, serverless computing, object storage) when deploying agent-based systems are considered. A hypothetical industrial case is presented – a multi-agent quality control system for a metalworking enterprise, combining computer vision agents, measurement protocol analysis agents, and report generation agents. It is shown that proper integration of multi-agent AI systems with MLOps practices and cloud infrastructure provides the required level of reliability, observability, and cost manageability while maintaining high solution flexibility.

Keywords: multi-agent systems, artificial intelligence, MLOps, cloud technologies, large language models, agent orchestration, quality management, digitalization.

Развитие больших языковых моделей и моделей машинного обучения общего назначения за последние несколько лет привело к качественному скачку в архитектуре прикладных интеллектуальных систем. Если ещё в начале 2020-х годов типовым решением считался монолитный сервис с единственной моделью, то к настоящему времени всё большее распространение получают многоагентные (мультиагентные) AI-системы – программные комплексы, в которых задача декомпозируется и решается несколькими

взаимодействующими между собой автономными агентами, каждый из которых обладает собственной ролью, набором инструментов и зоной ответственности [5].

Многоагентный подход обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с монолитным: повышается прозрачность принятия решений, упрощается локализация ошибок, появляется возможность гибкого масштабирования и замены отдельных компонентов без переобучения системы в целом. Вместе с тем эксплуатация многоагентных AI-систем в промышленной среде сталкивается с рядом нетривиальных вызовов, связанных с недетерминированностью поведения, кумулятивной стоимостью вызовов внешних моделей, сложностью отладки длинных цепочек рассуждений и необходимостью соблюдения требований к надёжности и обеспечению доверия [4].

Цель настоящей работы – рассмотреть подходы к разработке и эксплуатации многоагентных AI-систем в контексте методологии MLOps и облачных технологий, обозначить ключевые архитектурные решения и предложить структуру MLOps-конвейера, учитывающего специфику агентных систем. В качестве иллюстрации применимости рассматриваемого подхода приводится гипотетический промышленный кейс – мультиагентная система контроля качества продукции металлообрабатывающего предприятия.

Методологическая основа исследования включает: системный анализ архитектурных подходов к построению мультиагентных AI-систем, обобщение современных практик MLOps применительно к моделям на основе больших языковых моделей и облачных решений, а также метод сравнительного анализа альтернативных подходов к построению AI-систем по совокупности качественных критериев. На базе указанных подходов в работе последовательно рассматриваются три взаимосвязанных аспекта предметной области: архитектура мультиагентных AI-систем, особенности MLOps-конвейера для них и роль облачных технологий в их промышленной эксплуатации.

Архитектура многоагентных AI-систем

Под многоагентной AI-системой в настоящей работе понимается программный комплекс, в котором конечная задача пользователя решается путём согласованного взаимодействия нескольких автономных или полуавтономных агентов. Каждый агент представляет собой оболочку над моделью машинного обучения (как правило – большой языковой моделью), снабжённую системным промптом, набором доступных инструментов (функций, API внешних сервисов, баз знаний) и определённой ролью в общем процессе [5]. Способность языковых моделей сочетать в едином процессе порождение цепочек рассуждений и вызов внешних действий составляет основу современных агентных архитектур [6].

Типовая архитектура мультиагентной системы включает следующие компоненты (таблица 1).

Таблица 1

Компоненты типовой архитектуры мультиагентной системы

Компонент	Функция
Агент-планировщик (planner)	Декомпозиция пользовательской задачи на подзадачи и формирование плана их выполнения
Агенты-исполнители (workers)	Решение узкоспециализированных подзадач: поиск информации, написание кода, анализ изображений, обращение к корпоративной базе данных
Агент-критик (critic)	Контроль качества промежуточных результатов и, при необходимости, инициирование повторного выполнения шагов
Слой оркестрации (orchestrator)	Маршрутизация сообщений между агентами, ведение общего контекста, обработка ошибок и логирование
Общая память (shared memory) и хранилище состояний	Обмен промежуточными результатами между агентами и сохранение долговременного контекста

Взаимодействие компонентов системы может быть реализовано в различных топологиях. В иерархической топологии планировщик выступает диспетчером и последовательно направляет задачи исполнителям. В топологии «диалога» агенты обмениваются сообщениями в формате чата, постепенно сходясь к решению; именно этот паттерн положен в основу ряда современных мультиагентных фреймворков на базе LLM [7]. В топологии «графа» (graph-based) явно описывается направленный граф переходов между агентами, что повышает предсказуемость поведения, но снижает гибкость. На практике в промышленных решениях преобладает гибридный подход, сочетающий жёсткую графовую логику для критичных операций и более свободный диалоговый режим для творческих задач.

Сравнительная характеристика монолитного, мультиагентного и гибридного подходов к построению AI-систем приведена в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение подходов к построению AI-систем

Критерий	Монолитный LLM-агент	Мультиагентная система	Гибридный подход
Сложность разработки	Низкая	Высокая	Средняя
Масштабируемость	Ограниченная	Высокая	Высокая
Стоимость инференса	Низкая	Высокая	Средняя
Прозрачность решений	Низкая	Высокая	Высокая
Отказоустойчивость	Низкая	Высокая	Средняя
Сложность MLOps-конвейера	Низкая	Высокая	Средняя

Особенности MLOps-конвейера для многоагентных систем

Классическая методология MLOps (Machine Learning Operations) формировалась в первую очередь применительно к моделям, обучаемым на табличных данных или статичных корпусах: основное внимание уделяется версионированию датасетов, обучению, тестированию и развёртыванию модели, а также мониторингу её качества в продуктивной среде [8]. Применительно к многоагентным системам на основе больших языковых моделей классические принципы MLOps требуют существенного расширения.

Во-первых, ключевым артефактом, требующим версионирования и тестирования, становится не только сама модель, но и системные промпты агентов, описания инструментов, схемы их вызова и конфигурации оркестратора. Изменение одного предложения в системном промпте планировщика может радикально изменить поведение всей системы, поэтому промпты должны храниться в системе контроля версий, проходить рецензирование и сопровождаться регрессионными тестами.

Во-вторых, традиционные метрики качества (точность, полнота, F1-мера) для мультиагентных систем должны быть дополнены метриками, специфичными для агентного взаимодействия: процент успешных завершений задачи, среднее количество шагов до получения ответа, доля «зацикливаний» агентов, корректность выбора инструмента, согласованность ответов между запусками. Для оценки качества цепочек рассуждений всё чаще применяется методика «LLM-as-a-judge», когда отдельная модель играет роль автоматизированного эксперта-оценщика.

В-третьих, мониторинг продуктивной эксплуатации мультиагентных систем требует отслеживания семантического дрейфа – постепенного смещения характера пользовательских запросов и распределения промежуточных решений агентов. Дрейф во входных данных может приводить к деградации качества даже при неизменных промптах и моделях. Для его обнаружения применяются методы кластеризации эмбеддингов запросов, анализ распределения длин цепочек рассуждений и контроль семантического сходства ответов с эталонными.

В-четвёртых, важнейшим аспектом эксплуатации становится управление стоимостью инференса. Каждый шаг работы агента – это вызов внешней модели, который тарифицируется по числу токенов. Стоимость одного завершённого пользовательского запроса в мультиагентной системе может в десятки раз превышать стоимость аналогичного запроса в монолитном решении. Поэтому MLOps-конвейер должен включать средства бюджетирования: ограничения на максимальное число шагов агента, кэширование повторяющихся запросов, маршрутизацию простых задач на более дешёвые модели и эскалацию сложных на более мощные.

Наконец, отдельную сложность представляет воспроизводимость экспериментов. Большие языковые модели по умолчанию не детерминированы (генерация осуществляется со стохастической выборкой токенов), а при работе через API провайдеров возможны изменения версии модели на стороне

поставщика без явного уведомления. Для обеспечения воспроизводимости рекомендуется фиксировать версию модели в явном виде, использовать нулевую температуру для критичных компонентов, сохранять полные журналы всех вызовов с входными и выходными данными, а также автоматически формировать «снимки» (snapshots) поведения системы на эталонном наборе сценариев.

Расширенный MLOps-конвейер для мультиагентных систем целесообразно представлять в виде пяти связанных контуров: контур разработки и версионирования (код, промпты, описания инструментов), контур обучения и оценки (включая офлайн-оценку цепочек рассуждений), контур развёртывания (CI/CD-конвейеры с канареечными релизами и A/B-тестированием), контур наблюдаемости (метрики, логи, трассировки агентных вызовов) и контур управления стоимостью и безопасностью. Подобная структура согласуется с современным пониманием жизненного цикла цифровых инноваций на основе искусственного интеллекта, продолжительность отдельных этапов которого определяется уровнем зрелости MLOps в организации [2].

Облачные технологии в эксплуатации мультиагентных систем

Развёртывание мультиагентных AI-систем предъявляет специфические требования к инфраструктуре. С одной стороны, нагрузка на такие системы носит ярко выраженный неравномерный характер: длительные интервалы относительно низкой активности перемежаются всплесками, когда количество одновременных пользовательских сессий возрастает в десятки раз. С другой стороны, отдельные операции – например, обращения к корпоративным базам данных или выполнение сгенерированного кода в изолированной среде – требуют наличия специализированных вычислительных ресурсов. Сочетание этих требований делает облачную инфраструктуру естественным выбором при промышленной эксплуатации.

Платформы контейнерной оркестрации – в первую очередь Kubernetes и его управляемые версии в облачных провайдерах – обеспечивают необходимые возможности горизонтального масштабирования, балансировки нагрузки, автоматического восстановления после сбоев и изоляции компонентов [10]. Каждый агент или группа агентов может разворачиваться в виде отдельного микросервиса с собственной политикой масштабирования, что позволяет независимо масштабировать «высоконагруженные» компоненты (например, агентов-планировщиков) при сохранении базовой нагрузки на остальные.

Бессерверные вычисления (serverless functions) удобны для реализации инструментов, вызываемых агентами эпизодически: парсинг документов, отправка уведомлений, обращения к внешним API. Использование бессерверной модели позволяет существенно снизить стоимость владения системой за счёт оплаты только фактически потреблённых ресурсов, а также автоматически масштабироваться от нуля до тысяч одновременных вызовов.

Объектные хранилища (S3-совместимые сервисы) применяются для долговременного хранения артефактов: версий промптов, эталонных наборов для регрессионного тестирования, журналов агентных трассировок, моделей собственной разработки. Векторные базы данных (как полностью управляемые, так и развёртываемые в виде сервиса в кластере) обеспечивают семантический поиск по корпоративной базе знаний, выступая ключевым компонентом инструментария агентов в рамках паттерна Retrieval-Augmented Generation.

Особое внимание в облачной инфраструктуре уделяется наблюдаемости. Для мультиагентных систем критически важна сквозная трассировка пользовательской сессии через всю цепочку агентов: от исходного запроса до финального ответа. Современные стандарты, в частности, OpenTelemetry с расширениями для генеративных AI-систем [9] позволяют унифицировано собирать метрики, логи и трассы в единое хранилище и визуализировать полные цепочки рассуждений в виде дерева вызовов с информацией о времени отклика, расходе токенов и принятых решениях.

Информационная безопасность мультиагентных систем в облаке требует комплексного подхода: изоляция выполнения сгенерированного кода в изолированных средах выполнения, контроль исходящего трафика инструментов агентов, защита от атак типа «prompt injection» через механизмы валидации входных данных и разграничения привилегий, шифрование чувствительных данных как при передаче, так и в покое. Управляемые сервисы облачных провайдеров (системы управления секретами, идентификацией и доступом, аудита) существенно упрощают выполнение этих требований.

Гипотетический пример: мультиагентная система контроля качества продукции

Для иллюстрации применимости рассматриваемого подхода приведём гипотетический промышленный кейс – мультиагентную систему контроля качества продукции для условного металлообрабатывающего предприятия, выпускающего серийные партии прецизионных деталей.

Бизнес-задача состоит в автоматизации первичного анализа результатов контрольных операций: оператор отдела технического контроля получает с измерительных машин и систем компьютерного зрения большой объём разнородных данных: протоколы координатно-измерительных машин, фотоснимки поверхностей деталей, журналы автоматических средств измерения. На основании этих данных необходимо в течение нескольких минут принять решение о приёмке или браке партии, оформить акт и при выявлении систематических отклонений сформулировать гипотезу о причине дефекта. Задача автоматизации подобных операций согласуется с общей концепцией цифровизации систем менеджмента качества, предполагающей охват всех этапов жизненного цикла изделия средствами автоматической регистрации параметров процесса и аналитики в реальном времени [1].

Архитектура предлагаемой системы включает четырёх агентов. Агент-планировщик принимает идентификатор партии, извлекает из корпоративной системы технологическую карту и формирует план проверки. Агент компьютерного зрения, обращающийся к специализированной модели сегментации (например, к одной из современных архитектур семейства YOLO, хорошо зарекомендовавших себя в задачах автоматического обнаружения поверхностных дефектов [3]) анализирует фотоснимки поверхностей и классифицирует дефекты (царапины, забоины, следы коррозии). Агент анализа измерений сопоставляет данные протоколов координатно-измерительной машины с допусками, заданными в чертеже, и идентифицирует размеры, выходящие за поле допуска. Агент-составитель отчётов формирует структурированный акт по корпоративному шаблону и, при необходимости, пояснительную записку с предположениями о причинах систематических отклонений.

Над агентами работает слой оркестрации, реализованный в виде графа: задано фиксированное число шагов и допустимых переходов, что обеспечивает предсказуемость поведения и облегчает аудит. Каждый агент вызывается со строгим лимитом по числу токенов и времени выполнения; при превышении лимитов задача эскалируется человеку-оператору.

MLOps-инфраструктура системы включает: хранилище версий промптов и описаний инструментов в системе контроля версий, эталонный набор из нескольких сотен исторических партий с известными результатами для регрессионного тестирования, автоматизированный конвейер ночных запусков, который отслеживает снижение метрики «task success rate» ниже установленного порога, и систему мониторинга расходов на API внешних моделей с ежедневными отчётами и автоматическими ограничениями при превышении бюджета.

Развёртывание выполнено в управляемом Kubernetes-кластере. Каждый агент представляет собой отдельный микросервис; служебные операции (загрузка изображений из объектного хранилища, формирование PDF-актов) реализованы как бессерверные функции. Сквозная трассировка обеспечивается через OpenTelemetry: каждая пользовательская сессия снабжается уникальным идентификатором, и в системе наблюдаемости можно полностью восстановить ход рассуждений всех агентов, причём с указанием конкретной версии модели и промпта на каждом шаге. Это критически важно при разборе спорных случаев, когда система отнесла партию к браку, а оператор с этим не согласился.

В качестве условных целевых показателей системы можно ориентироваться на следующие значения: сокращение среднего времени первичной обработки партии в несколько раз по сравнению с ручным режимом; доля автоматически обработанных партий, не потребовавших вмешательства оператора, на уровне 70–80%; стоимость одного завершённого анализа в пределах операционного бюджета, заданного экономическим обоснованием

проекта. Конкретные числовые значения подлежат уточнению при пилотном внедрении и валидации на реальных данных предприятия.

Многоагентные AI-системы представляют собой перспективное направление развития прикладного искусственного интеллекта, сочетающее гибкость, прозрачность и масштабируемость. Вместе с тем их промышленная эксплуатация невозможна без зрелой инженерного обеспечения – расширенного MLOps-конвейера, учитывающего специфику агентного взаимодействия, и облачной инфраструктуры, обеспечивающей необходимый уровень масштабируемости, наблюдаемости и безопасности.

В работе показано, что классические практики MLOps требуют расширения по нескольким направлениям: версионирование промптов и инструментов, оценка качества цепочек рассуждений, мониторинг семантического дрейфа, управление стоимостью инференса и обеспечение воспроизводимости в условиях недетерминированных моделей. Облачные технологии: контейнерная оркестрация, бессерверные вычисления, объектные и векторные хранилища, средства сквозной трассировки и управления безопасностью образуют технологический фундамент, на котором эти практики могут быть эффективно реализованы.

Рассмотренный гипотетический пример мультиагентной системы контроля качества продукции иллюстрирует, что грамотная интеграция мультиагентного подхода с практиками MLOps и облачной инфраструктурой позволяет получить решение, удовлетворяющее одновременно требованиям к качеству, надёжности, прозрачности и управляемости стоимостью. Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке унифицированных методик регрессионного тестирования агентных систем, формализации метрик качества цепочек рассуждений и создании отраслевых эталонных архитектур мультиагентных решений для задач управления качеством.

Список литературы

1. Васильев В.А. Цифровые технологии в управлении качеством / В.А. Васильев, С.В. Александрова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 10. – С. 35–41.

2. Вертакова Ю.В. Особенности структуры жизненного цикла цифровых инноваций, основанных на использовании искусственного интеллекта / Ю.В. Вертакова, Ю.В. Шульгина, Б.Ш. Собиров // π-Economy. – 2025. – Т. 18, № 5. – С. 81–99. – DOI: 10.18721/JE.18506.

3. Васильев М.Е. Обзор версий YOLO: одноэтапная модель сверточной нейронной сети / М.Е. Васильев, А.С. Шалимов, О.А. Савина // Universum: технические науки: электронный научный журнал. – 2025. – № 6 (135). – URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/20293 (дата обращения: 29.04.2026).

4. ГОСТ Р 59276–2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2020 г. № 1371-ст: дата введения 2021-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2021.

5. Wang L. A survey on large language model based autonomous agents / L. Wang, C. Ma, X. Feng [et al.] // Frontiers of Computer Science. – 2024. – Vol. 18, № 6. – Article 186345. – DOI: 10.1007/s11704-024-40231-1.

6. Yao S. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models / S. Yao, J. Zhao, D. Yu [et al.] // International Conference on Learning Representations (ICLR 2023): proceedings. – Kigali, Rwanda, 2023. – arXiv:2210.03629.

7. Wu Q. AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via Multi-Agent Conversation Framework / Q. Wu, G. Bansal, J. Zhang [et al.]. – Текст: электронный. – arXiv:2308.08155. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2308.08155 (дата обращения: 29.04.2026).

8. Treveil M. Introducing MLOps: How to Scale Machine Learning in the Enterprise / M. Treveil, N. Omont, C. Stenac [et al.]. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2020. – 184 p. – ISBN 978-1-4920-8329-0.

9. OpenTelemetry Semantic Conventions for Generative AI Systems. – Текст: электронный // OpenTelemetry: [сайт]. – URL: https://opentelemetry.io/docs/specs/semconv/gen-ai/ (дата обращения: 29.04.2026).

10. Kubernetes Documentation. – Текст: электронный // The Kubernetes Authors: [сайт]. – URL: https://kubernetes.io/docs/home/ (дата обращения: 29.04.2026).

Бабухин А.О.
студент
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
babuhinalex@yandex.ru
Ибатулин М.Ю.
старший преподаватель кафедры УИТС
МГТУ «СТАНКИН»
Российская Федерация, Москва
uits_stankin@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АГЕНТ-ОРКЕСТРАТОР КАК ИНСТРУМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ БИЗНЕС-КОММУНИКАЦИЙ И УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Аннотация. В статье рассматривается концепция интеллектуального агента-оркестратора как инструмента цифровизации процессов управления качеством бизнес-коммуникаций и управленческих решений. Актуальность исследования обусловлена тем, что в современных цифровых организациях значительная часть управленческой информации формируется в рабочих коммуникациях, встречах, корпоративных чатах, BI-системах, CRM, таск-трекерах и внутренних документах. Однако решения, задачи, причины, последствия и бизнес-показатели часто остаются фрагментированными и не формируют единую управленческую память организации. Цель статьи заключается в разработке концептуальной модели интеллектуального агента-оркестратора, обеспечивающего формирование единого организационного контекста, накопление управленческого опыта и поддержку принятия решений на основе данных. Методологическую основу исследования составляют анализ научной литературы по интеллектуальному управлению бизнес-процессами с применением ИИ (AI-Augmented BPM), системам организационной памяти (Organizational Memory Systems), интеллектуальным агентам на основе больших языковых моделей (LLM-агентам), методам дополненной генерации с поиском по базе знаний (RAG), подходам рассуждения и действия в языковых моде-

лях (ReAct), системам поддержки принятия решений (Decision Support Systems) и интеллектуальному анализу бизнес-процессов (Process Mining), а также сравнительный анализ существующих цифровых решений. В статье выявлены ключевые проблемы управления бизнес-коммуникациями, рассмотрены ограничения BI, CRM, BPM, таск-трекеров и AI-assistants, предложена архитектура агента-оркестратора и описан цикл формирования организационного опыта. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной модели в цифровых организациях для повышения качества управленческих решений.

Ключевые слова: искусственный интеллект, агент-оркестратор, управление бизнес-процессами, организационная память, большие языковые модели, дополненная генерация, поддержка принятия решений, интеллектуальный анализ процессов, бизнес-коммуникации, управление качеством.

Babukhin A.O.
Student
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
babuhinalex@yandex.ru
Ibatulin M.Yu.
Senior Lecturer at the of the Department of MITS
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
uits_stankin@mail.ru

INTELLIGENT ORCHESTRATOR AGENT AS A TOOL FOR DIGITALIZING QUALITY MANAGEMENT PROCESSES IN BUSINESS COMMUNICATIONS AND MANAGERIAL DECISION-MAKING

Annotation. The article examines the concept of an intelligent orchestrator agent as a tool for digitalizing quality management processes in business communications and managerial decision-making. The relevance of the study is determined by the fact that in modern digital organizations a significant part of managerial information is formed within working communications, meetings, corporate chats, BI systems, CRM systems, task trackers, and internal documents. However, decisions, tasks, causes, consequences, and business indicators often remain fragmented and do not form a unified organizational memory. The purpose of the article is to develop a conceptual model of an intelligent orchestrator agent that provides the formation of a unified organizational context, accumulation of managerial experience, and support for data-driven decision-making. The methodological basis of the study includes an analysis of scientific literature on AI-Augmented BPM, Organizational Memory Systems, LLM-based agents, Retrieval-Augmented Generation, the ReAct approach, Decision Support Systems, and Process Mining, as well as a comparative analysis of existing digital solutions. The article identifies key problems of business communication management, examines the limitations of BI, CRM, BPM, task trackers, and AI assistants, proposes the architecture of an orchestrator agent, and describes the cycle of organizational experience formation. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the proposed model in digital organizations to improve the quality of managerial decision-making.

Keywords: artificial intelligence, orchestrator agent, business process management, organizational memory, large language models, retrieval-augmented generation, decision support, process mining, business communications, quality management.

Цифровизация процессов управления качеством в современных организациях выходит за рамки автоматизации отдельных операций. В цифровой экономике объектом управления качеством становятся не только производственные и регламентированные процессы, но и бизнес-коммуникации, управленческие решения, аналитика и способность организации сохранять управленческий опыт. Современные сотрудники работают в условиях интенсивного цифрового потока. Согласно Microsoft Work Trend Index, объем данных, писем, чатов и встреч формирует так называемый «цифровой долг» (digital debt), который затрудняет выполнение основной работы и снижает способность к стратегическому мышлению [1]. По данным Asana Anatomy of Work Global Index, значительная часть рабочего времени уходит на координацию, поиск информации и коммуникации о работе, а не на выполнение основной деятельности [2]. В этих условиях значительная часть управленческой информации формируется не только в формальных системах, но и в рабочих коммуникациях: чатах, письмах, встречах, отчетах, CRM, BI-системах и таск-трекерах. Однако эта информация часто остается фрагментированной: решения принимаются в одном канале, задачи фиксируются в другом, показатели анализируются в третьем, а причины и последствия управленческих действий остаются в памяти отдельных сотрудников. Ключевая проблема заключается в том, что современные цифровые системы хранят данные, но не формируют единую причинно-следственную управленческую память. BI-системы показывают изменение показателей, CRM хранит клиентский контекст, таск-трекеры фиксируют задачи, а коммуникационные платформы сохраняют обсуждения. Однако сами по себе эти инструменты не отвечают на вопросы: почему было принято решение, какие альтернативы рассматривались, какие показатели были до и после, помогло решение или нет.

В связи с этим возникает необходимость в новом типе цифрового инструмента – интеллектуальном агенте-оркестраторе. Такой агент должен выступать не обычным чат-ботом или ИИ-ассистентом, а единым контекстным слоем организации, способным объединять коммуникации, бизнес-показатели, задачи, процессы, решения и результаты. Его задача заключается не в замене лица, принимающего решение, а в предоставлении полного контекста, быстрой аналитики, истории похожих кейсов и аргументированных рекомендаций. Цель статьи – разработать концептуальную модель интеллектуального агента-оркестратора как инструмента цифровизации процессов управления качеством бизнес-коммуникаций и управленческих решений.

Методологическая основа исследования включает системный анализ подходов к цифровизации процессов управления качеством бизнес-коммуникаций, обобщение современных исследований в области интеллектуального управления бизнес-процессами с применением ИИ, систем организационной памяти и интеллектуальных агентов на основе больших языковых моделей, а также метод сравнительного анализа существующих цифровых

решений по совокупности качественных критериев. На базе указанных подходов в работе последовательно рассматриваются три взаимосвязанных аспекта предметной области: проблема фрагментации организационного управленческого контекста, ограничения существующих цифровых инструментов управления коммуникациями, задачами и аналитикой, а также концептуальная архитектура интеллектуального агента-оркестратора как единого контекстного слоя организации. Научный фундамент статьи находится на пересечении трех направлений.

Первое направление – интеллектуальное управление бизнес-процессами с применением ИИ (AI-Augmented BPM), где ИИ рассматривается как средство повышения адаптивности, проактивности, объяснимости и контекстной чувствительности бизнес-процессов [3]. Второе направление – системы организационной памяти (Organizational Memory Systems), связанные с накоплением, хранением и повторным использованием знаний организации [4][5]. Третье направление – интеллектуальные агенты на основе больших языковых моделей, использующие планирование, память и внешние инструменты для решения задач [6].

1. Проблематика фрагментации организационного контекста

В современных организациях управленческий контекст распределен между различными цифровыми системами: чатами, BI, CRM, таск-трекерами, электронными письмами, встречами, документами, таблицами и базами данных. Каждая система хранит определенный фрагмент информации, но не формирует целостной причинно-следственной модели бизнеса. Например, BI-система показывает изменение маржинальности, но не объясняет, какое управленческое решение могло привести к этому изменению. Чат содержит обсуждение проблемы, но не связывает его с последующим результатом. Таск-трекер фиксирует задачу, но не всегда хранит полный контекст ее появления. CRM содержит клиентскую историю, но не отражает внутреннюю управленческую логику компании. В результате возникает фрагментация организационного контекста. Это означает, что организация может иметь данные, коммуникации, задачи и отчеты, но не иметь единого источника управленческой памяти. Ключевые проблемы управления бизнес-коммуникациями и организационным контекстом описаны ниже (таблица 1).

Таблица 1

Ключевые проблемы управления бизнес-коммуникациями и организационным контекстом

№	Проблема	Как проявляется	Управленческий риск
1	*2*	*3*	*4*
1	Фрагментация организационного контекста	Данные, решения, задачи и коммуникации находятся в разных системах	ЛПР не видит полной картины бизнеса
2	Отсутствие накопления управленческого опыта	Решения и их последствия не сохраняются как кейсы	Организация повторяет ошибки и теряет успешные стратегии

Окончание табл. 1

1	*2*	*3*	*4*
3	Разрыв между аналитикой и reasoning	BI показывает цифры, но не объясняет управленческий контекст	Решения принимаются без учета причин и прошлого опыта
4	Потеря решений в коммуникациях	Идеи и договоренности остаются в чатах и встречах	Решения не фиксируются и не контролируются
5	Зависимость от человеческой памяти	Контекст хранится в голове сотрудников	Уход или перегрузка сотрудников ведут к потере знаний
6	Отсутствие единого источника для ЛПР	Руководитель собирает данные вручную из разных систем	Увеличивается время и риск ошибки при принятии решения
7	Ограниченность существующих систем	BI, CRM, BPM и task tracker решают отдельные задачи	Не формируется единая организационная память

Эти проблемы особенно критичны для компаний с высокой скоростью управленческого цикла и большим объемом цифровых коммуникаций. В таких организациях управленческие решения часто связаны с ключевыми бизнес-показателями, клиентскими условиями, ресурсами, сроками, операционными рисками и изменениями внутренних процессов. Ошибка в интерпретации данных или потеря управленческого контекста может привести к снижению эффективности, росту издержек, ухудшению качества обслуживания клиентов, увеличению рисков и замедлению реакции на изменения внешней и внутренней среды.

2. Анализ существующих цифровых решений

Для решения указанных проблем организации используют различные цифровые инструменты: BI, CRM, BPM, таск-трекеры, meeting AI, process mining, RPA и AI-assistants. Однако каждый из этих инструментов решает только часть задачи.

Сравнение существующих решений представлено ниже (таблица 2).

Таблица 2

Сравнение существующих решений

Система	Что делает	Чего не делает	Какую часть проблемы закрывает	Ограничения
1	*2*	*3*	*4*	*5*
BI	Показывает показатели, динамику, отклонения	Не хранит контекст решений и коммуникаций	Аналитика состояния бизнеса	Не объясняет, почему было принято решение
CRM	Хранит клиентские данные и историю взаимодействия	Не формирует управленческую память компании	Клиентский контекст	Не связывает внутренние решения с результатами
BPM	Описывает и формализует бизнес-процессы	Не всегда отражает реальные неформальные коммуникации	Управление регламентированными процессами	Слабо работает с гибкими обсуждениями

Окончание табл. 2

1	*2*	*3*	*4*	*5*
Task tracker	Хранит задачи, сроки, ответственных	Не сохраняет причины и последствия решений	Контроль исполнения	Не формирует причинно-следственную модель
Meeting AI	Делает саммари встреч	Не связывает саммари с BI, задачами и результатами	Сохранение содержания встречи	Не создает организационную память
AI assistant	Отвечает на вопросы, помогает писать тексты	Не является единым контекстным слоем бизнеса	Поддержка отдельных пользователей	Не управляет циклом организационного опыта
Process mining	Анализирует фактическое выполнение процессов по логам	Не всегда работает с коммуникациями и неформальными решениями	Анализ процессов	Требует событийных данных
RPA	Автоматизирует повторяющиеся операции	Не понимает управленческий контекст	Операционная автоматизация	Низкая гибкость при сложных решениях
Агент-оркестратор	Объединяет коммуникации, BI, задачи, решения и память	Требует интеграций и контроля качества	Единый управленческий контекст	Сложность реализации и эксплуатации

Интеллектуальный анализ бизнес-процессов (Process Mining) является важным направлением цифрового управления, поскольку позволяет выявлять фактическое выполнение процессов на основе событийных данных. Однако современные исследования показывают, что анализа процессов недостаточно, если его результаты не переходят в конкретные управленческие действия. В статье «Action-oriented process mining: bridging the gap between insights and actions» подчеркивается необходимость преодоления разрыва между аналитическими выводами и практическими действиями по улучшению процессов [10].

Следовательно, существующие цифровые решения являются полезными, но недостаточными для формирования единого управленческого контекста. Они хранят отдельные типы данных – показатели, задачи, клиентскую информацию, журналы событий или коммуникации, – однако не обеспечивают непрерывный цикл накопления организационного опыта: от выявления проблемы и анализа контекста до принятия решения, оценки последствий и сохранения результата в управленческой памяти организации.

3. Архитектурные подходы к построению интеллектуального агента

Для построения интеллектуального агента-оркестратора можно использовать несколько современных подходов: монолитный LLM-assistant, RAG, ReAct, tool-using agent, мультиагентную систему и гибридного агента-оркестратора [6][7][8][9]. Архитектурные подходы к построению AI-агентов описаны ниже (таблица 3).

Таблица 3

Архитектурные подходы к построению AI-агентов

Подход	Суть	Преимущества	Ограничения	Применимость к статье
Монолитный LLM-assistant	Одна модель отвечает на запросы	Простота реализации	Нет устойчивого организационного контекста	Недостаточен
RAG	Модель использует внешнюю базу знаний	Ответы можно обосновывать документами	Зависит от качества базы знаний	Необходимый компонент
ReAct	Чередование рассуждения и действия	Позволяет обращаться к инструментам	Требует контроля действий	Важен для оркестрации
Tool-using agent	Агент вызывает внешние API и системы	Можно подключать BI, CRM, БД	Нужны интеграции и безопасность	Необходимый компонент
Multi-agent system	Несколько специализированных агентов	Масштабируемость и разделение ролей	Сложность эксплуатации	Перспективное развитие
Гибридный агент-оркестратор	Объединяет RAG, инструменты, память, аналитику и human-in-the-loop	Баланс реалистичности и перспективности	Требует архитектурной дисциплины	Целевой вариант

В контексте данной статьи наиболее целесообразным является гибридный подход к построению интеллектуального агента-оркестратора. Такой подход не сводит систему к обычному чат-боту или универсальному ИИ-ассистенту, но при этом не требует на первом этапе разработки сложной автономной многоагентной инфраструктуры. На начальном уровне агент-оркестратор может быть реализован как единая система организационной памяти (Organizational Memory), контекстных рекомендаций (Contextual Recommendation) и поддержки принятия решений на основе данных (Decision Intelligence). В дальнейшем такая система может быть расширена до полноценного интеллектуального слоя оркестрации организации (Orchestration Layer), объединяющего коммуникации, бизнес-показатели, задачи, регламенты и историю управленческих решений. Выбор данного подхода согласуется с современными исследованиями в области интеллектуальных агентов на основе больших языковых моделей. В обзоре L. Wang и соавторов “A Survey on Large Language Model based Autonomous Agents” автономные агенты на базе больших языковых моделей рассматриваются как системы, сочетающие планирование, память, использование инструментов и взаимодействие с внешней средой [6]. Это подтверждает возможность построения агентных систем, способных работать не только с текстом, но и с данными, задачами и внешними цифровыми сервисами. Кроме того, в работе Q. Wu и соавторов “AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via Multi-Agent Conversation” представлен фреймворк AutoGen, демонстрирующий возможность создания приложений, в которых несколько агентов взаимодействуют между собой, используют внешние инструменты и могут

включать человека в контур принятия решений [9]. Это важно для предлагаемой модели, поскольку критичные управленческие решения должны оставаться под контролем ответственного лица, а агент должен выполнять функции анализа, накопления опыта и подготовки рекомендаций.

4. Предлагаемая концепция интеллектуального агента-оркестратора

Предлагаемый интеллектуальный агент-оркестратор рассматривается как система оркестрации организационного опыта, обеспечивающая непрерывное формирование, накопление, анализ и повторное использование управленческого контекста и причинно-следственных знаний бизнеса. Главная логика работы такой системы может быть представлена в виде цикла:

Контекст → Опыт → Аналитика → Рекомендация → Действие → Новый опыт

Данный цикл отражает не статичное хранение информации, а постоянное развитие организационной памяти. На первом этапе система анализирует текущую ситуацию бизнеса: рабочие коммуникации, показатели BI-систем, задачи, процессы, документы и результаты встреч. На втором этапе агент обращается к организационной памяти и выявляет похожие прошлые кейсы. Далее система анализирует, какие управленческие решения применялись ранее, к каким результатам они привели и при каких условиях оказались эффективными или неэффективными. На основе этого агент формирует варианты действий и аргументы для лица, принимающего решение. После принятия решения система отслеживает последствия, фиксирует результат и сохраняет новый кейс в организационную память.

Таким образом, агент-оркестратор не просто анализирует текст или формирует отчеты, а создает механизм организационного обучения, в котором каждое управленческое действие становится частью накопленного опыта компании. При этом рекомендации системы должны быть объяснимыми: для управленческих решений важно не только получить готовый вариант действия, но и понимать, на каких данных, прошлых кейсах и логике он основан. В работе I. Nunes и D. Jannach “A systematic review and taxonomy of explanations in decision support and recommender systems” систематизированы подходы к объяснениям в рекомендательных системах и системах поддержки принятия решений, а также показано значение объяснимости для доверия пользователей к таким системам [11].

5. Архитектура системы

Архитектура агента должна включать несколько взаимосвязанных слоев. В отличие от классического AI-assistant, агент-оркестратор не ограничивается генерацией текста, а работает с коммуникациями, данными, задачами, регламентами, бизнес-показателями и организационной памятью.

Архитектура интеллектуального агента-оркестратора представлена ниже (таблица 4).

Таблица 4

Архитектура интеллектуального агента-оркестратора

Слой / модуль	Назначение	Входные данные	Выходные данные	Роль в управлении качеством
Context Formation Layer	Формирование текущего бизнес-контекста	Чаты, встречи, задачи, BI, CRM	Карта текущей ситуации	Позволяет видеть целостную картину
Communication Intelligence Layer	Анализ коммуникаций	Сообщения, стенограммы, письма	Саммари, задачи, решения, риски	Снижает потерю управленческой информации
Data & BI Integration Layer	Получение бизнес-показателей	BI, БД, отчеты	Показатели до/после, отклонения	Связывает решения с метриками
anizational Memory Layer	Хранение управленческого опыта	Кейсы, решения, последствия	База организационной памяти	Позволяет переиспользовать опыт
Contextual Analytics Layer	Анализ похожих ситуаций	Текущий контекст и прошлые кейсы	Сравнение, релевантность, риски	Повышает качество аналитики
Recommendation Layer	Формирование рекомендаций	Аналитика, регламенты, кейсы	Варианты действий	Поддерживает ЛПР
Decision & Action Layer	Фиксация решения	Решение ЛПР, задачи, сроки	Зафиксированное действие	Обеспечивает прозрачность управления
Monitoring & Feedback Layer	Отслеживание последствий	BI после внедрения, статусы задач	Оценка результата	Позволяет измерять эффект решений
Experience Update Layer	Обновление памяти	Результаты, выводы, риски	Новый кейс	Формирует organizational learning loop
Quality & Safety Layer	Контроль качества и безопасности	Логи, доступы, ошибки	Проверки, ограничения, эскалации	Снижает риски ошибочных рекомендаций

С точки зрения инженерной реализации важным условием является наблюдаемость системы: необходимо фиксировать не только итоговую рекомендацию агента, но и цепочку его действий – использованные источники данных, вызванные инструменты и основания вывода. Это позволяет ЛПР проверить логику работы системы и восстановить, на чем основано предложенное управленческое действие. В качестве ориентира для логирования и трассировки AI-вызовов могут использоваться семантические соглашения OpenTelemetry для генеративных AI-систем [12].

В результате исследования была выявлена ключевая проблема современных цифровых организаций – фрагментация организационного контекста. Показано, что значительная часть управленческой информации формируется в коммуникациях, BI-системах, CRM, задачах, встречах и внутренних документах, однако эти элементы часто не объединяются в единую управленческую память. Вследствие этого решения, причины их принятия, последствия и связанные бизнес-показатели существуют разрозненно, что усложняет принятие решений на основе полного контекста. Сравнительный

анализ существующих цифровых решений показал, что BI, CRM, BPM-системы, таск-трекеры, инструменты автоматической расшифровки и анализа встреч, RPA, интеллектуальный анализ бизнес-процессов и обычные ИИ-ассистенты решают отдельные задачи, но не обеспечивают непрерывный цикл формирования организационного опыта. BI-системы позволяют анализировать показатели, но не сохраняют контекст управленческих решений; таск-трекеры фиксируют задачи, но не отражают причины и последствия их появления; ИИ-ассистенты помогают пользователю в отдельных действиях, но не формируют целостную организационную память. В качестве решения предложена концептуальная модель гибридного интеллектуального агента-оркестратора. Архитектура системы объединяет анализ бизнес-коммуникаций, интеграцию с BI-системами и базами данных, модуль организационной памяти, контекстную аналитику, механизм рекомендаций, участие человека в контуре принятия решений и контроль качества работы системы.

Основой предложенной модели является цикл формирования организационного опыта:

контекст → опыт → аналитика → рекомендация → действие → новый опыт.

Такой цикл позволяет не только фиксировать управленческие решения, но и сохранять их последствия, анализировать эффективность прошлых стратегий и использовать накопленный опыт в будущих управленческих ситуациях. Практическим результатом исследования является архитектура системы, позволяющей цифровизировать контроль решений, управленческую память, качество коммуникаций, межфункциональные связи и контекст принятия решений. Предложенная модель может использоваться как основа для дальнейшей разработки прототипа и проведения пилотного внедрения в цифровой организации.

Список литературы

1. Microsoft. Work Trend Index 2023: Will AI Fix Work? – 2023. – URL: https://news.microsoft.com/en-xm/2023/08/02/microsofts-2023-work-trend-index-report-reveals-impact-of-digital-debt-on-innovation-emphasizes-need-for-ai-proficiency-for-every-employee/

2. Asana. Anatomy of Work Global Index 2023. – 2023. – URL: https://investors.asana.com/news-releases/news-release-details/asana-anatomy-work-global-index-2023-smart-collaboration-and/

3. Dumas M. AI-Augmented Business Process Management Systems: A Research Manifesto / M. Dumas, F. Fournier, L. Limonad [et al.] // ACM Transactions on Management Information Systems. – 2023. – Vol. 14, № 1.

4. Stein E. W. Actualizing Organizational Memory with Information Systems / E. W. Stein, V. Zwass // Information Systems Research. – 1995. – Vol. 6, № 2. – P. 85–117. – DOI: 10.1287/isre.6.2.85. – URL: https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/isre.6.2.85

5. Barros V. F. A. Information Systems and Organizational Memory: A Literature Review / V. F. A. Barros, I. Ramos, G. Perez // Journal of Information Systems and Technology Management. – 2015. – Vol. 12, № 1. – URL:

https://jistem.tecsi.org/index.php/jistem/article/view/10.4301%252FS1807-17752015000100003

6. Wang L. A Survey on Large Language Model based Autonomous Agents / L. Wang, C. Ma, X. Feng [et al.] // Frontiers of Computer Science. – 2024. – Vol. 18, № 6. – Article 186345. – DOI: 10.1007/s11704-024-40231-1. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11704-024-40231-1

7. Yao S. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models / S. Yao, J. Zhao, D. Yu [et al.] // International Conference on Learning Representations, ICLR 2023. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2210.03629

8. Lewis P. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks / P. Lewis, E. Perez, A. Piktus [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – URL: https://arxiv.org/abs/2005.11401

9. Wu Q. AutoGen: Enabling Next-Gen LLM Applications via Multi-Agent Conversation / Q. Wu, G. Bansal, J. Zhang [et al.]. – arXiv:2308.08155. – 2023. – URL: https://arxiv.org/abs/2308.08155

10. Armas-Cervantes A. Action-oriented process mining: bridging the gap between insights and actions / A. Armas-Cervantes, M. Dumas, M. La Rosa [et al.] // Progress in Artificial Intelligence. – 2022. – Vol. 11. – P. 257–269. – DOI: 10.1007/s13748-022-00281-7. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s13748-022-00281-7

11. Nunes I. A systematic review and taxonomy of explanations in decision support and recommender systems / I. Nunes, D. Jannach // User Modeling and User-Adapted Interaction. – 2017. – Vol. 27. – P. 393–444. – DOI: 10.1007/s11257-017-9195-0. – URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11257-017-9195-0

12. OpenTelemetry. Semantic conventions for generative AI systems. – URL: https://opentelemetry.io/docs/specs/semconv/gen-ai/

СЕКЦИЯ 7
СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ КОМПАНИЙ

Романец В.И.
аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
romanec-2000@yandex.ru
Колосова О.В.
д.т.н., профессор Высшей школы технологического предпринимательства
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, Санкт-Петербург
kolosova@yandex.ru

АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СУБЪЕКТОВ МАЛОГО И СРЕДНЕГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА

Аннотация. Высокая динамичность среды функционирования предприятий обуславливает важность таких качеств системы менеджмента качества, как гибкость и адаптивность. Малые и средние предприятия, являясь важными акторами современной экономики, остаются наиболее уязвимыми ее составляющими вследствие ограниченности внутренних ресурсов разных типов. Построение адаптивной, гибкой системы менеджмента качества, ориентированной на применение в таких субъектах, является важным шагом на пути к повышению их устойчивости. При этом сохраняется необходимость избегания излишней концептуальной сложности и ресурсоемкости формируемой структуры управления. Разнородные и разноуровневые ограничения определяют необходимость пересмотра как способов применения отдельных инструментов и методов управления качеством, так и решений концептуального уровня. Отдельной задачей становится построение адекватной процессной модели системы менеджмента качества. В настоящей статье рассматриваются возможности построения целевой системы менеджмента качества, обеспечивающей адаптивность предприятия, на концептуальном уровне. Предлагаются конкретные меры по адаптации существующих концепций и практик в сферах управления качеством и общего менеджмента. Приводится пример процессной модели целевой системы менеджмента качества. Формируется вывод о возможностях дальнейшего развития управления качеством в рамках целевых объектов.

Ключевые слова: ГОСТ Р ИСО 9001-2015, система менеджмента качества, управление качеством, малое и среднее предпринимательство, инструменты качества, процессный подход, гибкие методологии.

Romanets V.I.
Postgraduate Student
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, Saint Petersburg
romanec-2000@yandex.ru
Kolosova O.V.
Doctor of of Technical Sciences, Professor
of the Graduate School of Technological Entrepreneurship
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Russia, Saint Petersburg
kolosova@yandex.ru

ADAPTIVE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM MODEL FOR SMALL AND MEDIUM-SIZED ENTERPRISES

Abstract. The high dynamism of the enterprise operating environment underscores the importance of such qualities of a quality management system as flexibility and adaptability. Small and medium-sized enterprises, while being important actors in the modern economy, remain its most vulnerable components due to limited internal resources of various types. Developing an adaptive, flexible quality management system tailored for application in such entities is an important step towards enhancing their resilience. At the same time, the need to avoid excessive conceptual complexity and resource intensity of the resulting management structure persists. Heterogeneous and multi-level constraints necessitate a revision of both the ways individual quality management tools and methods are applied, as well as conceptual-level solutions. A separate challenge is the construction of an adequate process model of the quality management system. This article examines the possibilities of constructing, at the conceptual level, a target quality management system that ensures enterprise adaptability. Specific measures for adapting existing concepts and practices in the fields of quality management and general management are proposed. An example of a process model of the target quality management system is provided. A conclusion is drawn regarding the potential for further development of quality management within the target entities.

Keywords: GOST R ISO 9001-2015, quality management system, quality management, small and medium-sized enterprises, quality tools, process approach, agile methodologies.

Построение технологического суверенитета требует особого внимания к развитию экономических акторов, выступающих источниками инноваций. Важными примерами таких экономических субъектов выступают различные стартапы, а также малые и средние промышленные предприятия в целом: свойственная таким организациям гибкость, высокая скорость принятия решений и сравнительно низкая степень бюрократизации процессов обеспечивает результативность инновационной деятельности как внутренней направленности (например, в виде формирования уникальных инструментов для кооперации и отслеживания работы членов команды), так и внешней, связанной с разработкой и выводом на рынок новых продуктов. Необходимость участия субъектов малого и среднего предпринимательства (МСП) в становлении инновационной экономики подтверждается рядом исследований [1–3]. Понимание важности поддержки таких предприятий для развития экономики нашло отражение и в создании специализированного статуса малой технологической компании (МТК) с четкими критериями установления [4]. В то же время, сохраняется уязвимость субъектов МСП перед динамично меняющимися условиями среды функционирования, связанная с ограниченностью собственных ресурсов [5], нехваткой профессиональных компетенций у руководства и возможностью формального внедрения инструментов и практик управления качеством [6] и самой природой штучного или мелкосерийного производства, ограничивающей применение классических инструментов статистического контроля качества. При этом

даже стандартные методологические ориентиры для построения системы менеджмента качества (СМК) общего типа могут быть малоприменимы как вследствие вышеупомянутых ограничений, так и ввиду исторического зарождения самой концепции управления качеством современного типа в условиях крупного бизнеса. Более того, различие в рыночных стратегиях и доступных ресурсах приводит к значительным различиям в самой структуре ключевых процессов малых и крупных предприятий одной и той же сферы. Таким образом, необходима как адаптация к условиям целевых субъектов конкретных инструментов качества, так и пересмотр общей концепции управления качеством и применяемых процессных моделей.

Целью настоящей работы является формирование адаптивной модели системы менеджмента качества субъекта МСП процессного типа, отвечающей следующим критериям:

- низкая структурная сложность;
- гибкость и адаптивность;
- низкая ресурсоемкость.

Методологической основой исследования выступает системный анализ развития экономики России, специфики деятельности субъектов МСП, содержания действующих национальных стандартов в области управления качеством, а также результатов более ранних исследований. Получаемые данные подвергались анализу в целях выявления общих закономерностей и последующего синтеза модели СМК, нацеленной на соответствие установленным критериям.

В качестве источника основных требований к СМК, наиболее часто учитываемых на рынке, выступает стандарт ГОСТ Р ИСО 9001-2015, содержащий также типовую процессную модель и основные принципы управления качеством:

- ориентация на потребителя;
- лидерство;
- взаимодействие людей;
- процессный подход;
- улучшение;
- принятие решений, основанных на свидетельствах;
- менеджмент взаимоотношений [7].

В предшествующей работе была обоснована возможность эффективного применения сочетания 7 классических и 7 новых инструментов качества в качестве соответственно тактических и стратегических решений для СМК субъектов МСП при учете их сильных и слабых сторон и соответствующей модернизации [8]. На техническом уровне обеспечение выполнения требований ГОСТ Р ИСО 9001-2015 может быть упрощено целенаправленным внедрением цифровых технологий, разнообразие которых определяет их применимость в рамках различных процессов [9, 10]. Одновременно это

разнообразие в связке с широкими возможностями комбинации инструментов качества положительно влияет на адаптивность и гибкость всей системы в целом, параллельно повышая ее устойчивость вследствие взаимозаменяемости отдельных решений. Также выполняется и требование к низкому уровню ресурсоемкости системы на инструментальном уровне: простота применяемых инструментов качества на методологическом уровне позволяет избежать больших затрат на консалтинг или дополнительное обучение, тогда как применимые категории цифровых инструментов (ERP, CRM, СУБД, автоматизированный электронный документооборот, чат-боты, дашборды и т.д.) включают в себя решения различных ценовых уровней, включая бесплатное и условно-бесплатное программное обеспечение.

На концептуальном уровне повысить адаптивность и гибкость СМК может включение отдельных элементов классических гибких методологий менеджмента, таких как Agile, Scrum, Kanban, Lean и иные [11]. Среди направлений применения выделяется адаптация системы мониторинга процессов: классическая система внутренних аудитов и регулярных анализов со стороны руководства требуют как выделения полноценной службы СМК, так и значительных временных затрат со стороны высшего руководства, что может быть финансово обременительно для средних предприятий и малореализуемо в условиях малых предприятий. В то же время добавление системы перекрестных проверок (peer review), где это применимо, может автоматизировать удаление мелких несоответствий еще до этапа внутреннего аудита со стороны службы СМК. Более того, внедрение методик типа «5 Почему» в совокупности с инструментами типа диаграммы Исикавы может позволять выявлять коренные причины несоответствий уже на уровне линейного руководителя, что также повышает гибкость СМК и скорость реакции на негативные явления и снижает нагрузку на менеджмент. Точно так же характерная для гибких методологий регулярная практика «мозгового штурма» может значительно ускорить процесс внедрения локальных улучшений в процессы, сокращая при этом его трудоёмкость, в том числе, в части согласования с высшим руководством. Облегчить вовлечение персонала в новую активность может помочь внедрение элементов идеологии кайдзен. Кроме того, такой гибридный подход позволяет одновременно с материалами для стандартной отчетности выявлять недокументированные знания, способные превратиться в ключевой ресурс организации. Предлагаемая модель СМК с ключевыми методологическими и техническими решениями представлена на рисунке.

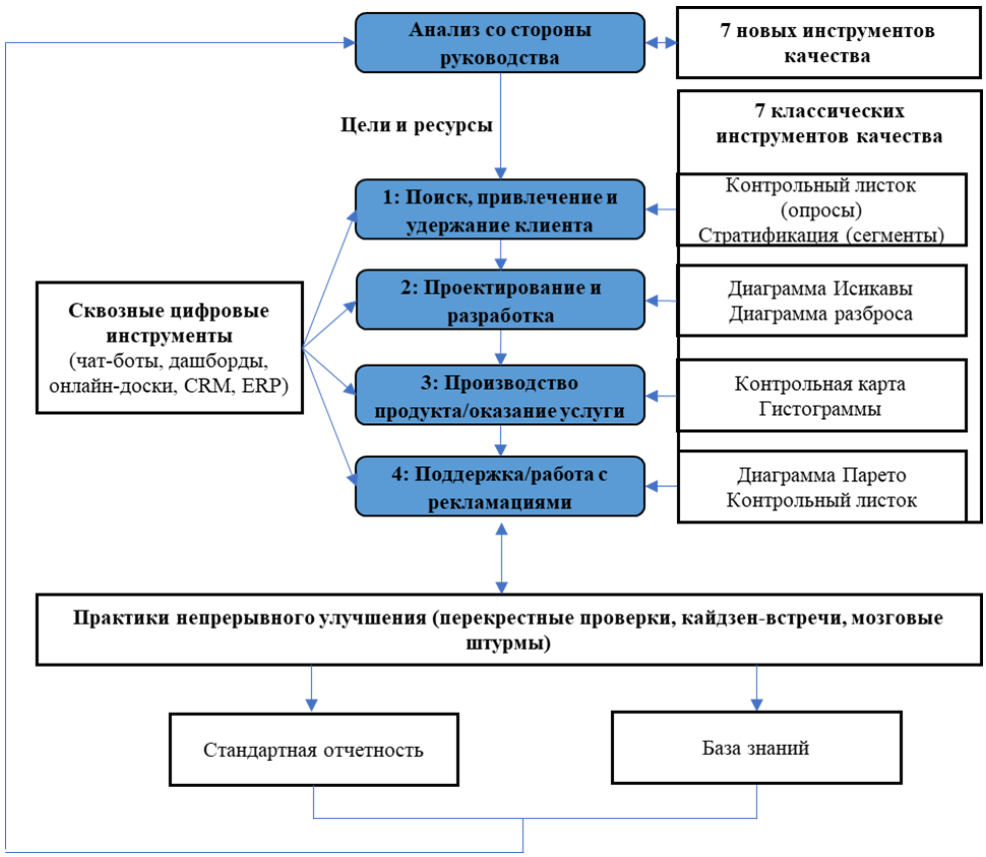


Рис. Адаптивная модель системы менеджмента качества

В рамках настоящей работы были рассмотрены особенности управления качеством в субъектах МСП и основные возможности направления, предложены общие направления работ по обеспечению адаптивности СМК в целевых субъектах. Представленная модель СМК носит общий характер и может быть модернизирована в соответствии с особенностями производственных процессов в конкретных отраслях экономики. При этом добавление новых решений должно проводиться с учетом общей сложности системы во избежание возрастания трудоемкости и/или ресурсоемкости поддержания ее функционирования, превышающего потенциальную пользу от нововведений.

Дальнейшие работы могут быть направлены на более детальную проработку предложенной модели, а также на формирование системы численной оценки эффективности, ресурсоемкости, гибкости или структурной сложности рассматриваемых вариантов комплексной структуры СМК целевых объектов.

Список литературы

1. Петров, М. Н., Филиппов, Я. С., Петрова, В. М. Научно-технологическая самодостаточность России: принципы формирования концепции национальной безопасности в условиях глобальной трансформации // Прогрессивная экономика. 2025. № 4. С. 108–122. DOI: 10.54861/27131211_2025_4_108.

2. Продченко, И. А. Место и роль малых инновационных предприятий в национальной инновационной системе / И. А. Продченко, С. В. Шкодинский // Вестник Академии права и управления. – 2016. – № 1(42). – С. 101–109. – EDN VPICSZ.

3. Сысоева, О. В. Малые инновационные предприятия как элемент развития экономики знаний / О. В. Сысоева // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. – 2019. – № 1(21). – С. 118–127. – EDN OPWELH.

4. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.11.2023 № 1847 «Об отнесении технологических компаний к малым технологическим компаниям и о прекращении статуса малых технологических компаний, формировании и ведении реестра малых технологических компаний и об информационном взаимодействии» // СЗ РФ, № 46 от 13.11.2023 (ч. I), ст. 8248.

5. Алаторцева О.А., Никифорова Д.С., Горбунова А.Д., Гареева В.Р. Особенности и основные проблемы развития малого и среднего бизнеса в России // ЭСГИ. 2024. №2 (42), с. 6–18.

6. Лакеев, М. Ю. Внедрение функциональной системы менеджмента качества ISO 9001 на малом предприятии / М. Ю. Лакеев, С. В. Чекайкин, А. О. Холуденева // Наукосфера. – 2022. – № 7–1. – С. 141–147. – DOI 10.5281/zenodo.6673163. – EDN CKJRYX.

7. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.

8. Колосова, О. В. Применение 7 классических и 7 новых инструментов качества в малых технологических компаниях / О. В. Колосова, В. И. Романец // Наука сегодня: актуальные вопросы теории и практики : Сборник статей VII Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 июля 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 33–35. – EDN CSSCSK.

9. Степаненко, Я. Д. Цифровые технологии в обеспечении системы менеджмента качества / Я. Д. Степаненко, Е. В. Огородник, Л. Ф. Казанская // Наука и образование транспорту. – 2025. – № 2. – С. 81–84. – EDN KILZZJ.

10. Колосова, О. В. Адаптация деятельности малых технологических компаний к требованиям ГОСТ р ИСО 9001-2015 / О. В. Колосова, В. И. Романец // Форум инноваций и передовых исследований: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 августа 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. – С. 80–83. – EDN LBZAXI.

11. Гибкий менеджмент в технологических стартапах / А. Л. Полтарыхин, В. В. Великороссов, И. А. Кокорев [и др.] // Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. – 2023. – № 4. – С. 168–175. – DOI 10.47576/2411-9520_2023_4_168. – EDN QAAPZZ.

Ряжева Ю.И.
к.э.н., доцент кафедры общего и стратегического менеджмента
Самарский университет
Россия, Самара
ryajeva.yui@ssau.ru
Пяткова Е.В.
студент
Самарский университет
Россия, Самара
pyatkova-2003@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЗРЕЛОСТИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается влияние зрелости системы менеджмента качества (СМК) на устойчивость предприятий автомобилестроения. Актуальность исследования определяется высокой сложностью и взаимосвязанностью процессов в автомобильной промышленности, где отклонения в одном элементе цепочки создания ценности способны вызывать системные последствия, влияющие на качество продукции и стабильность функционирования предприятия.

Ключевые слова: устойчивое развитие, система менеджмента качества, зрелость СМК, автомобилестроение, производственные процессы, процессный подход, управление качеством.

Ryazheva, Yu. I.
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
of the Department of General and Strategic Management
Samara University
Russia, Samara
ryajeva.yui@ssau.ru
Pyatkova E.V.
Student
Samara University
Russia, Samara
pyatkova-2003@mail.ru

THE IMPACT OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM MATURITY ON THE SUSTAINABILITY OF AUTOMOTIVE ENTERPRISES

Abstract. The article examines the influence of quality management system (QMS) maturity on the sustainability of automotive enterprises. The relevance of the study is determined by the high complexity and interdependence of processes in the automotive industry, where deviations in a single element of the value chain can generate systemic consequences affecting product quality and the overall stability of enterprise operations.

Keywords: sustainable development, quality management system, QMS maturity, automotive industry, production processes, process approach, quality management.

Автомобильная промышленность традиционно относится к числу наиболее требовательных отраслей с точки зрения организации производственных и управленческих процессов. Здесь любые отклонения − от качества комплектующих до несогласованности в цепочке поставок − быстро превращаются в системные риски, влияющие на безопасность продукции и устойчивость бизнеса. Поэтому вопросы построения и поддержания результативной системы менеджмента качества приобретают не формальный, а вполне прикладной характер.

В российской практике ключевую нормативную основу в этой области задаёт ГОСТ Р ИСО 9001 [1]. Он фиксирует общие требования к системе менеджмента качества и задает логику работы организации через процессный подход, ориентацию на результат и управление рисками. Однако для автомобильного сектора этих рамок недостаточно. Отрасль предъявляет более жёсткие ожидания к стабильности процессов, дисциплине поставщиков и прослеживаемости продукции, что отражено в ГОСТ Р 58139, адаптирующем общие принципы ISO 9001 под специфику автопрома и аналогичному IATF 16949 [2, 3,4].

Дополнительное значение имеет ГОСТ Р ИСО 9004, который выходит за пределы минимального соответствия требованиям и рассматривает организацию через призму устойчивого развития [5]. В этом стандарте акцент смещается на долгосрочную результативность: зрелость процессов, качество управленческих решений, развитие компетенций и способность системы адаптироваться к изменениям внешней среды. Понятие устойчивого развития известно с конца XX века и с момента принятия в 1980-е годы Программы ООН становится все более актуальным. Концепция устойчивости развития является все более важной для промышленности, поскольку сталкивается с растущим давлением со стороны потребителей, инвесторов и регулирующих органов. Концепция ESG – это определенные принципы ведения бизнеса для его устойчивого развития, включая, бережное отношение к окружающей среде, социальную ответственность и ответственное корпоративное управление

В совокупности указанные стандарты формируют взаимодополняемую нормативную архитектуру. ГОСТ Р ИСО 9001 задаёт базовую модель функционирования СМК, ГОСТ Р 58139 уточняет её применение в условиях автомобильной отрасли, а ГОСТ Р ИСО 9004 расширяет управленческий горизонт, связывая качество с устойчивостью и развитием организации. Именно такое сочетание становится основой для анализа и оценки систем менеджмента качества в современном автопроме.

Исходной точкой для анализа зрелости системы менеджмента качества в автомобилестроении выступают положения ГОСТ Р ИСО 9001 как базового стандарта, задающего архитектуру СМК на основе процессного подхода. Внедрение системы менеджмента качества в соответствии с требованиями стандарта предполагает построение системы управления, основанной

на применении следующих принциповменеджмента: ориентация на потребителя; лидерство руководителя; вовлеченность персонала; процессный подход; системный подход; постоянное улучшение; принятие решений, основанных на свидетельствах; менеджмент взаимоотношений.

Однако сам по себе он не вводит формализованной шкалы зрелости. В отличие от него, логика уровней развития системы качества формируется через совокупность связанных документов и методических подходов, применяемых в практике аудита и отраслевых требований, прежде всего в ГОСТ Р 58139 и связанных с ним процедурах оценки СМК в автомобильной промышленности.

В российской и международной практике зрелость системы менеджмента качества обычно не закреплена в виде единой обязательной шкалы в ГОСТ Р ИСО 9001. Вместо этого используется комбинация требований ГОСТ Р ИСО 9001, отраслевых надстроек, моделей аудиторской оценки, а также концептуальных моделей зрелости, используемых в управленческом анализе.

В рамках автомобильной отрасли на практике формируется условная шкала зрелости СМК, которая проявляется через степень устойчивости процессов, предсказуемость результатов и глубину их управления (табл. 1).

Таблица 1

Условная модель уровней зрелости СМК в автомобилестроении

Уровень зрелости	Характеристика состояния СМК	Проявление в автомобилестроении
1. Начальный	Процессы неустойчивы, управление реактивное	Сбои в поставках, высокая вариативность качества, зависимость от отдельных сотрудников
2. Формализованный	Процессы описаны, но выполняются неравномерно	Наличие процедур ГОСТ Р ИСО 9001, но слабая дисциплина исполнения
3. Стабилизированный	Процессы воспроизводимы, есть базовое управление	Контроль качества на ключевых этапах производства, снижение дефектности
4. Управляемый	Процессы измеряются и контролируются на основе данных	Использование KPI, управление поставщиками, внедрение требований ГОСТ Р 58139
5. Оптимизированный	Постоянное улучшение и адаптация системы	Стабильное качество поставок, прогнозируемость процессов, интеграция улучшений и инноваций

В автомобилестроении переход от одного уровня зрелости к другому, как правило, не фиксируется формально − он скорее читается по тому, как меняется сама логика работы системы. На начальных этапах управление сводится к реакции на уже возникшие несоответствия, но по мере развития акцент смещается к упреждению – работе с рисками и потенциальными отклонениями. В этой логике требования ГОСТ Р 58139 приобретают особую

значимость: стандарт усиливает внимание к стабильности процессов, управлению цепочками поставок и дисциплине исполнения, фактически задавая более жёсткие рамки предсказуемости.

ГОСТ Р ИСО 9004 дополняет эту модель, расширяя её за пределы формального соответствия. Он ориентирует систему на долгосрочную результативность и устойчивость. Для автомобилестроения это принципиально: длительный жизненный цикл продукции и отложенные эффекты отклонений делают устойчивость процессов критическим фактором.

Показательно, что степень реализации этих принципов нельзя оценить исключительно через внешние показатели. На практике ключевым инструментом становится самооценка, позволяющая определить уровень зрелости системы менеджмента качества и понять, насколько глубоко принципы управления встроены в реальную деятельность предприятия.

Переход от оценки зрелости СМК к понятию устойчивости связан со смещением фокуса: важна уже не столько внутренняя упорядоченность системы, сколько её поведение в реальных условиях. Зрелость показывает, насколько процессы организованы, а устойчивость – выдерживает ли предприятие внешние и внутренние сбои без потери результата.

В автомобилестроении это проявляется особенно жёстко из-за высокой взаимосвязанности операций. Сбой в поставках, проектировании или сборке быстро «расползается» по всей цепочке. Поэтому устойчивость определяется прежде всего состоянием процессов СМК, выстроенных в логике ГОСТ Р ИСО 9001 и усиленных требованиями ГОСТ Р 58139.

При низкой зрелости система действует реактивно: дефекты устраняются по факту, решения локальны, причины остаются. Устойчивость в таком случае случайна и зависит от отдельных управленческих действий. По мере развития СМК ситуация меняется – процессы становятся измеримыми, контроль регулярным, а решения опираются на данные. Требования ГОСТ Р 58139 дополнительно «ужесточают» эту модель, усиливая дисциплину процессов, прослеживаемость и стабильность работы с поставщиками.

На более высоких уровнях зрелости система приобретает признаки предиктивного управления. Здесь уже недостаточно фиксировать отклонения – важно их предотвращать. Это соответствует логике ГОСТ Р ИСО 9004, где акцент смещается на устойчивый успех организации, способность к адаптации и развитие через улучшения и инновации. В автомобильной промышленности это выражается в стабилизации качества поставок, снижении вариативности процессов и повышении предсказуемости результатов на всех этапах жизненного цикла продукции.

Таким образом, зрелость СМК можно рассматривать как внутренний механизм формирования устойчивости предприятия. Чем выше уровень зрелости, тем более системным становится управление процессами, тем меньше зависимость от случайных факторов и тем выше способность предприятия автомобилестроения сохранять заданные параметры качества в

условиях изменяющейся внешней среды – будь то колебания спроса, сбои в цепочках поставок или технологические изменения.

В современных исследованиях переход от оценки зрелости системы менеджмента качества к анализу устойчивости предприятий автомобилестроения связывается не столько с пересмотром методик, сколько с изменением самого фокуса анализа: от проверки соответствия требованиям стандартов к оценке того, насколько организация способна удерживать стабильные результаты в условиях изменяющейся внешней и внутренней среды. В этой логике зрелость СМК перестаёт восприниматься как фиксированная стадия и рассматривается, скорее, как изменяющаяся характеристика, отражающая уровень развития управленческих практик и степень их встроенности в деятельность предприятия [6].

В научной литературе всё чаще подчёркивается, что система менеджмента качества может рассматриваться как инструмент реализации целей устойчивого развития, поскольку она объединяет экономические, экологические и социальные аспекты деятельности предприятия в единый управленческий контур [7]. В этом случае устойчивость перестаёт восприниматься как внешняя характеристика организации и начинает формироваться внутри самой системы менеджмента качества ─ через механизмы управления, анализа и постоянного совершенствования процессов.

Дополнительное уточнение данной взаимосвязи связано с рассмотрением зрелости как одного из факторов, определяющих устойчивость развития СМК. В исследованиях отмечается, что рост зрелости сопровождается повышением стабильности процессов, снижением вариативности результатов и усилением способности системы адаптироваться к изменениям внешней среды без потери управляемости [8]. В этом контексте зрелость выступает промежуточным уровнем между базовым соответствием требованиям и устойчивым функционированием организации.

Практическая значимость системы менеджмента качества в автомобилестроении проявляется не только в обеспечении соответствия требованиям ГОСТ Р ИСО 9001 и отраслевых норм ГОСТ Р 58139, но и в формировании измеримых эффектов, которые напрямую связаны с устойчивостью предприятия. В исследованиях отмечается, что развитие СМК приводит к комплексным изменениям в экономической, экологической и социальной подсистемах организации, при этом характер этих изменений зависит от уровня зрелости системы [9].

Ключевым моментом является то, что эффекты СМК носят не разрозненный, а системный характер. Они проявляются одновременно через снижение затрат и ресурсопотребления, повышение эффективности процессов, улучшение условий труда и сокращение негативного воздействия на окружающую среду. В условиях автомобилестроения это особенно значимо, поскольку высокая степень технологической связанности процессов усиливает влияние любого локального улучшения на всю цепочку создания ценности.

Содержательный анализ показывает, что экономический эффект внедрения СМК в автомобилестроении в основном выражается через снижение издержек и рост производительности (табл. 2). Это связано с уменьшением потерь, снижением числа несоответствий и повышением управляемости процессов. В логике ГОСТ Р ИСО 9001 данные результаты рассматриваются как следствие повышения стабильности и воспроизводимости процессов, а не как набор разрозненных улучшений.

Таблица 2

Измеримые эффекты внедрения СМК в автомобилестроении

Группа эффектов	Показатель	Изменение
Экономические	Снижение издержек	снижение затрат на производство и несоответствия на 15–20%
Экономические	Рост производительности	повышение эффективности процессов
Ресурсные	Снижение ресурсопотребления	На 15–20%
Экологические	Сокращение отходов	до 25%
Экологические	Снижение негативного воздействия	Снижение выбросов углекислого газа на 12 тыс. тонн в год
Социальные	Рост вовлеченности персонала	Рост удовлетворенности сотрудников на 22%
Социальные	Увеличение доли женщин в руководстве	Увеличение доли женщин в урководстве до 27%
Социальные	Улучшение условий труда	стабилизация и формализация рабочих процессов

Экологическая составляющая всё чаще формируется в связке с ESG-подходом и связана с более рациональным использованием ресурсов. Практика внедрения интегрированных моделей СМК и ESG на промышленных предприятиях показывает вполне измеримые эффекты: ресурсопотребление снижается в среднем на 15–20%, уменьшаются выбросы CO_2 и объёмы отходов. В отдельных отраслях – например, в металлургии и химии – сокращение отходов достигает около 20%, а выбросы уменьшаются на десятки тысяч тонн в год. В автомобильной промышленности это выражается прежде всего в снижении материалоёмкости и большей устойчивости к ресурсным ограничениям.

Социальные изменения также становятся заметнее: растёт вовлечённость сотрудников, расширяется их участие в улучшениях, повышается прозрачность распределения ответственности. По ряду оценок, удовлетворённость персонала увеличивается примерно на 20%, что со временем снижает текучесть и делает систему стабильнее, хотя требует вложений в обучение.

В итоге СМК начинает выполнять роль связующего механизма, через который ESG-принципы встраиваются в деятельность предприятия, увязывая экономические, экологические и социальные результаты. При этом цифровизация и адаптация модели под различные отраслевые условия усили-

вают её практическую применимость. В автомобилестроении это проявляется в формировании устойчивых конкурентных преимуществ и более сбалансированном развитии предприятия в логике устойчивого развития.

Зрелость системы менеджмента качества в автомобилестроении выходит за рамки формального соответствия ГОСТ Р ИСО 9001 и отражает реальную способность предприятия обеспечивать стабильность и управляемость процессов в логике ГОСТ Р 58139.

По мере её роста СМК смещается от реактивного устранения несоответствий к работе с данными, анализу и предупреждению отклонений, что соответствует подходам ГОСТ Р ИСО 9004. Это сопровождается снижением вариативности процессов, ростом их устойчивости и уменьшением зависимости от локальных управленческих решений.

Повышение зрелости связано с улучшением ключевых результатов: снижением издержек и ресурсопотребления, сокращением отходов, ростом производительности, а также улучшением условий труда. В автомобилестроении эффект усиливается из-за высокой взаимосвязанности процессов цепочки создания ценности.

В целом зрелость СМК выступает фактором устойчивости предприятия, формируемым через развитие системы процессов, а не отдельные улучшения. Система менеджмента качества при этом становится механизмом обеспечения стабильного функционирования в изменяющейся среде.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
2. ГОСТ Р 58139-2024. Системы менеджмента качества. Требования к организациям автомобильной промышленности. М.: Стандартинформ, 2025. 44 с.
3. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. ISO,2015. 28 p.
4. IATF 16949:2016 Quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. AIAG, ANFIA, © FIEV, © SMMT, VDA, 2016. 60 p.
5. ГОСТ Р ИСО 9004-2019. Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации – М.: Стандартинформ, 2019. 55 с.
6. Агаркова, Т. С. Оценка уровня зрелости систем менеджмента качества: проблемы и пути их решения в практической деятельности организаций / Т. С. Агаркова, А. А. Киселев // Теоретические и практические аспекты цифровизации Российской экономики : Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Ярославль, 29–30 ноября 2023 года. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2023. – С. 1028–1035.
7. Мороз, А. Ю. Система менеджмента качества для достижения целей устойчивого развития: целесообразность интеграции / А. Ю. Мороз // Качество и жизнь. – 2023. – № 4(40). – С. 18–20. – DOI 10.34214/2312-5209-2023-40-4-18-20.
8. Мухин М. П., Одиноков С. А. Оценка зрелости и устойчивое развитие системы менеджмента качества // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. №6.

9. Попов, Д. В. Системы менеджмента качества как драйвер устойчивого развития: анализ экологических, социальных и экономических эффектов / Д. В. Попов, Е. В. Желудков // СМиС-2025. Технологии управления качеством : материалы Международной научно-технической конференции, Москва, 21–24 мая 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 708–711.

Савостикова О.Г.
старший преподаватель кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Ксибати Д.
специалист ОДО
ФГБУ ВНИИИМТ Росздравнадзора
Россия, Москва
danny.hh@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА УПРАВЛЕНИЕ СТРАНОЙ

Аннотация. Управление качеством – это не только составная часть менеджмента качества, направленная на выполнение требований к качеству. Управление качеством – это большая наука, которая занимается разработкой научных основ и методов обеспечения и управления качеством. Предметом науки управления качеством является не только изучение параметров, которые определяют потребительские свойства продукции, но и социально-экономические и организационно-технические характеристики процессов создания продукции, потребления, утилизации, а также постоянное улучшение таких свойств и процессов. Науку об управлении качеством стоит рассматривать не только в рамках одной организации, но и за её пределами, например, в городе, стране, мире! Как показывает история, совершенствование процессов производства и качества продукции всегда сопровождалось индустриализацией или промышленной революцией, что приводило к более эффективному и дешёвому производству, которое способствовало увеличению доступности продукции потребителям. Современные тенденции диктуют нам другие правила игры, новый индустриальный этап, когда материальный мир соединяется с виртуальным. Это привнесёт коренные изменения производственных процессов. Масштабное внедрение киберфизических систем и цифровизация промышленности будут не осуществимы без правовых преобразований и политических реформ. Изменения должны касаться в государствах, а именно установить партнёрство с обществом, внедрить систему безусловного базового дохода с целью защиты прав населения в условиях экономики нового типа, поменять режим работы производства, интегрировать в систему управления производственным процессом для корреляций взаимоотношений с партнёрами.

Ключевые слова: управление, производство, экономика, качество, изменения.

Savostikova O.G.
Senior Lecturer of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Ksibati D.
Specialist of DSD

FSBI VNIIIMT of Roszdravnadzor
Russia, Moscow
danny.hh@yandex.ru

THE IMPACT OF QUALITY MANAGEMENT ON THE COUNTRY'S MANAGEMENT

Abstract. Quality management is not only an integral part of quality management aimed at meeting quality requirements. Quality management is a big science that develops scientific foundations and methods of quality assurance and management. The subject of quality management science is not only the study of the parameters that determine the consumer properties of products, but also the socio-economic, organizational and technical characteristics of the processes of product creation, consumption, disposal, as well as the continuous improvement of such properties and processes. The science of quality management should be considered not only within one organization, but also beyond its borders, for example, in a city, country, or the world! As history shows, the improvement of production processes and product quality has always been accompanied by industrialization or the industrial revolution, which led to more efficient and cheaper production, which increased the availability of products to consumers. Modern trends dictate different rules of the game, a new industrial stage, when the material world connects with the virtual one. This will bring fundamental changes to production processes. Large-scale implementation of cyber-physical systems and digitalization of industry will not be feasible without legal transformations and political reforms. The changes should concern states, namely, to establish partnership with society, introduce a system of unconditional basic income in order to protect the rights of the population in a new type of economy, change the mode of operation of production, integrate into the production process management system to correlate relationships with partners.

Keywords: management, production, economy, quality, changes.

Первым делом целесообразно провести ретроспективный анализ эволюции подходов к управлению качеством.

Первый этап. Революционные преобразования в высокотехнологичном производстве, начатые Генри Фордом, послужили основой современных производственных парадигм. Внедрение конвейерной сборки в США коренным образом трансформировало экономическую, трудовую и социальную сферы страны. Ключевым аспектом стало разделение труда, когда каждый рабочий выполнял узкоспециализированные, повторяющиеся задачи, а сама деталь перемещалась между ними. Это позволило сократить время сборки автомобилей почти на 90%, исключив лишние перемещения, что, в свою очередь, снизило себестоимость и способствовало росту производства. Социальные изменения также были значительными: в 1914 году Форд установил заработную плату в 5 долларов в день, стремясь уменьшить текучесть кадров на монотонных участках работы и обеспечить стабильность рабочей силы. Работа на конвейере также способствовала формированию и развитию профсоюзного движения, выступавшего за улучшение условий труда [1].

В 1905 году Фредерик Тейлор предложил теорию научной организации труда, оказавшую существенное влияние на повышение производительности.

Целью было улучшение производственных процессов на основе научных достижений, включая оптимизацию разделения труда, организацию рабочих мест, нормирование и повышение квалификации персонала. Это позволило снизить производственные издержки за счет более рационального использования ресурсов. Тейлор привнес научный подход в управление, подчеркнув важность автоматизации, обучения сотрудников и оптимизации затрат [1].

Второй этап. Система Шухарта. Статистический контроль. Статистический контроль процессов представляет собой метод мониторинга производства с помощью статистических инструментов для обеспечения качества непосредственно в процессе производства. Этот подход позволил рассматривать качество продукции как отражение стабильности производственных процессов, применимый как на уровне предприятия, так и на государственном уровне. Стабильность процессов является залогом выпуска продукции, соответствующей требованиям и ожиданиям заинтересованных сторон. Качество продукции, будучи ключевым фактором конкурентоспособности, отражает устойчивое положение страны или компании на рынке. Основная задача системы Шухарта – достижение стабильности процессов и минимизация их вариативности. Снижение вариативности в управлении государством имеет огромное значение для повышения эффективности, качества публичных услуг и удовлетворенности граждан. Это достигается через применение процессного подхода, статистических методов оценки, которые позволяют выявить причины отклонений в процессах. Также особую роль играет оптимизация процессов, благодаря которой происходит сокращение количества ролей, излишних действий и минимизация бюрократических процессов. Также достижение стабильности достигается через автоматизацию процессов и управление рисками [1].

Третий этап. Система Фейгенбаума. Комплексный контроль качества. Комплексный контроль качества воздействует на страну через экономические выгоды, социальное благополучие, повышение конкурентоспособности и обеспечение экологической безопасности. Этот подход требует учета всех производственных стадий и тесного взаимодействия всех структурных подразделений [1].

Экономический эффект:

- повышение международной и внутренней конкурентоспособности, рост прибыли от внешних продаж и доступности внутренней продукции;
- снижение потерь от брака за счет своевременного выявления отклонений;
- оптимизация расходов на обеспечение качества;
- гармонизация национальных стандартов с мировыми требованиями.

Социальная сфера:

- улучшение качества жизни за счет более долговечных, безопасных и отвечающих потребностям товаров;
- информирование потребителей для обеспечения прозрачности качества;

- стимулирование производителей к выпуску высококачественной продукции;

Конкурентоспособность:

- удовлетворение интересов всех сторон;
- укрепление рыночных позиций;
- гарантии в международной торговле, поддержка международной сертификации;
- соответствие национальных норм международным требованиям.

Экологическая безопасность:

- соблюдение экологических нормативов на всех этапах жизненного цикла продукции;
- гарантия безопасности для здоровья человека и окружающей среды.

Четвертый этап. Система Джурана. Тотальное управление качеством (TQM). Тотальное управление качеством (TQM) способствует формированию культуры качества и росту конкурентоспособности. Основная идея TQM заключается в постоянном совершенствовании не только продукции и услуг, но и всех аспектов деятельности организации или страны [1].

Преимущества внедрения TQM:

- расширение доступа к мировым рынкам;
- повышение лояльности клиентов;
- ускорение разработки инноваций;
- формирование позитивного имиджа страны.

Принципы TQM реализуются в государственном управлении через комплексный подход, охватывающий как частный сектор, так и государственное регулирование. TQM направлен на непрерывное совершенствование, опираясь на такие принципы, как ориентация на потребителя, вовлечение персонала, процессный подход и постоянное улучшение [1].

Ключевые принципы:

- ориентация на потребителя: Потребитель определяет уровень качества и является мерилом успеха;
- вовлечение персонала: Коллективная работа всех сотрудников для достижения общих целей;
- непрерывное совершенствование: Постоянная работа над улучшением всех аспектов деятельности организации/страны;
- принятие решений на основе данных: Систематический сбор и анализ информации для обоснованных управленческих решений.

Управление страной следует рассматривать как единую систему взаимосвязанных, взаимодействующих и взаимозаменяемых процессов, направленных на удовлетворение потребностей граждан и бизнеса. Избыточные процессы должны быть минимизированы для ускорения принятия решений и эффективного распределения ресурсов [1].

Пятый этап. Цикл PDCA Эдвардса Деминга и «японское экономическое чудо» (рисунок 1). Система управления по Демингу трансформирует

государственное управление, делая акцент на системном подходе, непрерывном совершенствовании и повышении качества.

Принципы:

- постоянство цели: Долгосрочная приверженность улучшению продуктов и услуг;
- новая философия: Отказ от принятия ошибок как неизбежности;
- прекращение опоры на массовый контроль: Внедрение качества в процесс с самого начала;
- отказ от выбора поставщиков исключительно по цене: Построение долгосрочных отношений, основанных на качестве;
- непрерывное усовершенствование системы: Постоянный поиск проблем для улучшения каждого процесса;
- обучение на рабочем месте;
- институционализация лидерства: Повышение эффективности работы людей и оборудования;
- устранение страха: Создание атмосферы, способствующей генерации идей;
- устранение барьеров между подразделениями: Поощрение командной работы.

Цикл Деминга (PDCA) способствует непрерывному улучшению, снижению издержек и повышению эффективности управления процессами и системами Идеи Деминга стали катализатором «японского экономического чуда». Он подчеркнул важность статистического подхода к качеству непрерывного совершенствования процессов [2].

Концепция Деминга: Улучшение качества → Снижение затрат → Повышение производительности → Завоевание рынка → Устойчивость бизнеса → Создание новых рабочих мест [2].

Другие факторы, способствовавшие росту Японии:

перераспределение трудовых ресурсов правительством.

трансфер технологий и знаний от американской оккупационной администрации.

экспортно-ориентированная торговая политика.



Рис. Японское экономическое чудо

В современном контексте управление страной следует рассматривать через призму концепции бережливого производства, что привело к появлению термина «бережливое государство». «Бережливое государство» – это концепция, предполагающая применение принципов и методов «бережливого производства» для оптимизации государственных управленческих процессов [3].

Концепция фокусируется на управлении и предоставлении услуг гражданам, а также на их постоянном улучшении за счет устранения «потерь» и «неэффективности» в процессах. В сфере государственных услуг делается акцент на сокращение сроков выполнения обращений граждан. Минимизация времени ожидания в очередях при получении государственных услуг является одним из ключевых показателей KPI. Правительственные структуры в странах, применяющих эту концепцию, рассматривают ее результат как улучшенное понимание функционирования внутренних процессов, что способствует быстрой разработке и внедрению улучшений, формируя тем самым культуру постоянного совершенствования [3].

Подходы «бережливого правительства» (управления) обычно характеризуются следующим образом:

- ориентация на клиента, направленная на максимизацию ценности, предоставляемой обществу, сообществу и/или другим заинтересованным сторонам;
- вовлечение сотрудников и внешних стейкхолдеров в постоянные улучшения и решение проблем;
- внедрение системы быстрого непрерывного совершенствования, ориентированной на реализацию, а не на длительное планирование;
- стремление к упрощению процессов и снижению вариативности их результатов;
- использование показателей производительности и визуальных инструментов управления для обеспечения оперативной обратной связи, что способствует улучшению принятия решений и решению проблем в режиме реального времени;
- применение системного мышления при совершенствовании деятельности.

Вывод: Управление качеством – это сфера человеческой деятельности, направленная на выработку, систематизацию объективных знаний о природе, обществе и мышлении в производственной среде. Каждый этап в управлении качеством организации/страны привёл к масштабным изменениям в различных сферах деятельности. Поэтому необходимо учитывать все преимущества различных систем для построения наиболее идеальной. От автоматизации конвейерного производства, предложенной Генри Фордом, до «бережливого государства», основанного на концепции бережливого производства, с перспективой промышленной цифровизации. Только таким образом можно войти в мир, где каждая машина дружит с человеком, так

как только такой подход обеспечит максимальный эффект от приобретённый мировых знаний о качестве и управления качеством.

Список литературы

1. Гродзенский С. Я., Управление качеством: учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Проспект, 2023. – 376 с.
2. Дружинин Н. Л. Японское экономическое чудо. – СПб.: «Питер», 2003. – 264 с. – 4 тыс. экз. – 5 тыс. экз.
3. Основы бережливого производства: учебник / [Н. С. Давыдова, Ю.А. Гуськова, Е.С. Куликова и др.]; под общ. ред. Е.А. Шашенковой. – 2-е изд., стер. – М.: Образовательно-издательский центр «Академия», 2024. – 208 с.

Левина Т.А.
к.э.н., заведующий кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
gta03@mail.ru
Грозовский Г.И.
д.т.н., профессор кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
grozg@mail.ru
Макушкин А.С.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
alex.mcn@yandex.ru

ИЗМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В СООТВЕТСТВИИ С ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ГОРНОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Аннотация. В статье рассматривается изменение адаптивных систем управления рисками (СУР) в соответствии с жизненным циклом горнорудного предприятия. На основе теоретической динамической модели, включающей активную, коммуникативную и реактивную фазы обеспечения безопасности, проведен анализ возможностей адаптации данной системы к специфике горного производства. Особое внимание уделено механизмам обратной связи при возникновении нежелательных событий и роли организационной культуры в повышении устойчивости системы. Предложены практические пути интеграции адаптивного подхода в существующие процессы управления промышленной безопасностью на рудниках.

Ключевые слова: адаптивная система управления рисками, жизненный цикл, горнорудное предприятие, промышленная безопасность, динамическая модель, обратная связь, организационная культура, устойчивое развитие.

Levina T.A.
Candidate of Economics, Head of the Department
of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
gta03@mail.ru
Grozovskiy G.I.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
grozg@mail.ru
Makushkin A.S.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
alex.mcn@yandex.ru

CHANGING ADAPTIVE RISK MANAGEMENT SYSTEMS ACCORDING TO THE LIFE CYCLE OF A MINING ENTERPRISE

Abstract. The article discusses the changes in adaptive risk management systems in accordance with the life cycle of a mining enterprise. Based on a theoretical dynamic model that includes active, communicative, and reactive phases of safety assurance, the article analyzes the possibilities of adapting this system to the specific features of mining operations. Special attention is given to the feedback mechanisms in the event of undesirable events and the role of organizational culture in enhancing the system's resilience. The article proposes practical approaches for integrating the adaptive approach into existing industrial safety management processes in mines.

Keywords: Adaptive risk management system, life cycle, mining enterprise, industrial safety, dynamic model, feedback, organizational culture, sustainable development.

Современная горнорудная промышленность относится к категории производств с высокими техногенными рисками [1]. Сложность геологических условий, интенсивное использование техники и влияние человеческого фактора создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций, способных повлечь тяжёлые последствия для жизни людей, окружающей среды и экономики предприятия.

Традиционные системы управления рисками, встроенные в систему менеджмента качества предприятия, зачастую оказываются недостаточно гибкими для адекватного реагирования на быстро меняющуюся обстановку в горнорудной промышленности.

В связи с этим возрастает актуальность внедрения адаптивных систем управления рисками (СУР), способных к самообучению и оперативной корректировке правил и процедур на основе анализа текущих событий, причем особое внимание уделяется формированию автономных систем на основе синергетического эффекта на всех этапах их жизненного цикла [2].

Модель адаптивной системы управления рисками в соответствии с жизненным циклом предприятия: теоретический аспект

Для обеспечения приемлемого уровня безопасности и внедрения системного подхода к управлению рисками разрабатывается СУР. СУР представляет собой концептуальную модель, отражающую понимание внешних условий и динамику управления рисками как непрерывный процесс, включающий деятельность персонала и использование инструментов контроля. Целью СУР является минимизация непредвиденных рисков для жизни и здоровья персонала, имущества предприятия и окружающей среды.

В традиционном понимании управление рисками встроено в общую систему управления предприятием и сопровождает весь его жизненный цикл. Однако в современном динамичном мире, где нет полностью предсказуемых процессов, любые модели имеют свои ограничения.

На рисунке представлена динамическая модель работы СУР, иллюстрирующая три ключевые фазы обеспечения безопасности [3].

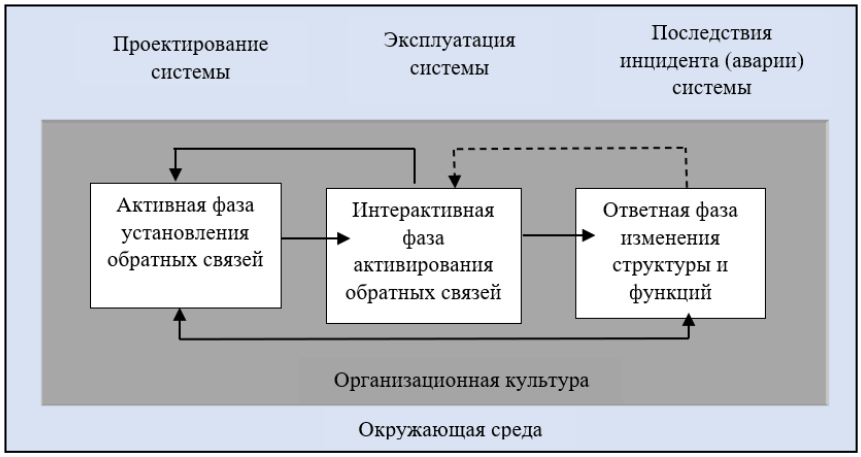


Рис. Динамическая модель системы управления рисками в соответствии с жизненным циклом предприятия

Данная модель концептуально отображает работу СУР: от стадии проектирования через штатную (нормальную) эксплуатацию к последствиям в случае аварийных ситуаций.

Модель выделяет три временных фазы, каждая из которых предъявляет свои требования к обеспечению безопасности: активная, коммуникативная (интерактивная) и реактивная.

Активная фаза включает меры, закладываемые на этапе проектирования: исходные системы, процедуры управления рисками, нормативные требования, инструкции, а также требования к навыкам и образованию персонала.

Коммуникативная фаза обеспечивает взаимодействие между всеми уровнями иерархии предприятия в процессе нормальной работы. Эта фаза позволяет адаптироваться к меняющимся условиям за счет обмена информацией.

Реактивная фаза срабатывает при отклонениях от нормальной эксплуатации и возникновении аварийных ситуаций.

Стрелки на диаграмме показывают механизмы обратной связи. В традиционных системах анализ последствий в реактивной фазе приводит к корректировке текущей работы. В адаптивной же системе реакция на нежелательные события средней тяжести другая: пунктирная стрелка от реактивной фазы к коммуникативной означает изменение правил, корректировку процедур и повышение уровня безопасности (создание барьеров) в процессе взаимодействия. Сплошная стрелка от реактивной фазы к активной срабатывает в случае тяжелых последствий, инициируя глубокие изменения в проектных основах СУР.

Следует обратить внимание, что на реальную систему влияют не только внутренние процессы, но и организационная культура, а также характер взаимодействия людей и технологий [4].

Применение адаптивной модели системы управления рисками в соответствии с жизненным циклом горнорудного предприятия

Горнорудная промышленность относится к отрасли с высоким уровнем риска, где геологические, технические и человеческие факторы тесно переплетены.

Применение описанной выше адаптивной модели СУР позволяет не просто фиксировать нарушения, а выстраивать «живую» систему безопасности, способную учиться на событиях и предотвращать тяжелые аварии. Исследования подтверждают, что адаптивный подход к управлению рисками позволяет сохранить стоимость проекта и сократить время реагирования на риски [5]. Благодаря этому снижается не только уровень аварийности, но и экономические потери от простоев оборудования и неэффективного использования ресурсов.

Рассмотрим вышеприведенные фазы адаптивной СУР в соответствии с жизненным циклом горнорудного предприятия:

Активная фаза: Проектирование безопасности горных работ

На этом этапе закладывается «фундамент» безопасности. На горнорудном предприятии активная фаза включает в себя не только проектную документацию горных выработок и паспорта буровзрывных работ. Это комплексный набор мер. Например:

- разработка проекта отработки месторождения с учетом горно-геологических условий;
- создание системы процедур и регламентов (паспорта буровзрывных работ, правила крепления горных выработок);
- определение регулирующих требований и контрольных точек (газовый контроль, пылеподавление);
- подбор и обучение персонала (например, маркшейдеры, взрывники, горные диспетчеры).

Коммуникативная фаза: Адаптация к изменяющимся условиям

Именно данная фаза делает систему адаптивной. Горные работы ведутся в постоянно меняющейся обстановке. Безопасность на горнорудном предприятии зависит от того, как информация передается между различными уровнями иерархии. Исследования показывают, что для безопасного ведения горных работ информация о безопасности имеет решающее значение, при этом различия в восприятии между менеджерами, операторами и рабочими могут потенциально влиять на показатели безопасности [6].

Коммуникативная фаза охватывает повседневную адаптацию к изменяющимся условиям, например:

- передача сведений об изменении различных условий от рабочего к его непосредственному руководителю;
- корректировка графиков добычи при ухудшении погодных условий на разрезе;
- обратная связь между персоналом при изменении качественного состава руды.

Приведем пример: при проходке тоннеля персонал фиксируют изменение структуры породы (появилась трещиноватость). Вместо того чтобы следовать первоначальному паспорту, включается коммуникативный контур: проходчик сообщает мастеру, мастер вызывает геолога и маркшейдера.

Совместное решение (интерактивная фаза) может привести к оперативной корректировке: изменению схемы крепления или параметров буровзрывных работ. Это и есть та самая пунктирная стрелка от реактивной фазы к коммуникативной, позволяющая предотвратить обрушение, не дожидаясь тяжелых последствий.

Реактивная фаза и обратные связи: Ответ на нарушения и аварии

В горнорудной промышленности нежелательные события случаются, несмотря на все меры предосторожности. Данная фаза включается, когда происходит инцидент – от микротравмы до серьезной аварии.

Реактивная часть СУР в традиционной модели фиксирует последствия и ищет виновных. Однако в адаптивной модели реакция становится более сложной и полезной для будущего развития системы.

Реакция на события средней тяжести (пунктирная стрелка)

Если произошло локальное обрушение породы или локальная поломка оборудования из-за мелкого схода породы на конвейер, не приведшее к жертвам, система не ждет глобальной аварии. Информация об инциденте поступает напрямую в коммуникативную и активную фазы.

В адаптивной системе анализируются не только причины поломки, но и особенности коммуникации – например, почему осыпь не была замечена вовремя? В ходе анализа инцидента необходимо ответить на вопрос, что послужило причиной события: технический сбой, ошибка оператора либо нарушение взаимодействия между оборудованием и персоналом. Возможно, требуется изменить регламент обхода, либо установить дополнительные датчики, либо провести внеплановый инструктаж о том, как визуально определять признаки неустойчивости и т.д. В коммуникативной фазе

система адаптируется. В результате на предприятии корректируется паспорт крепления выработок, изменяется процедуры контроля, усиливаются барьеры безопасности и т.д.

Реакция на тяжелые последствия (сплошная стрелка)

Если на горнорудном предприятии происходит авария (например, прорыв воды или взрыв метана), проектные решения подвергаются глубокой переработке, а информация (сигнал) сразу передаётся в активную фазу – на этап проектирования. Это означает, что проект рекомендуется полностью пересмотреть вплоть до смены технологии или отказа от опасных методов ведения работ. Для рассматриваемого примера, пересматривается также и стратегия осушения месторождения или система дегазации.

Таким образом, система перепроектируется с учётом новых требований безопасности, а на всех будущих участках вводятся дополнительные барьеры для предотвращения аналогичных сценариев.

Особенности внедрения на горном предприятии

Безопасность в горнорудной промышленности зависит не только от внутренних процессов и инструкций, но и от организационной культуры и взаимодействия между персоналом и оборудованием. Исследования показывают, что эффективная коммуникация влияет на соблюдение требований, поскольку культура безопасности усиливает эффективность коммуникационных процессов [7].

Задача интегрированной адаптивной системы – не просто наказать за ошибку или выпуск некачественной продукции, а создать условия, при которых последствия ошибки не приведут к катастрофе, а сама ошибка станет точкой роста для всей системы безопасности и качества. Другими словами, необходимо сместить фокус с поиска виновного на поиск первопричины и уязвимости в системе.

Таким образом, недостаточно просто установить датчики (технологии). Необходимо чтобы персонал на различных уровнях иерархии предприятия доверял друг другу и мог оперативно останавливать работы при малейшем подозрении на опасность, не боясь штрафов за простой.

В условиях высокой неопределенности горного производства способность системы быстро учиться на инцидентах (реактивная фаза) и менять поведение людей и правила (коммуникативная фаза) часто важнее, чем идеальный первоначальный проект. Это и есть практическая реализация концепции устойчивого развития безопасности на горном предприятии.

Жизненный цикл горнорудного предприятия – это непрерывный процесс эволюции. Изменение адаптивных СУР в соответствии с жизненным циклом представляет собой непрерывный процесс, выходящий за рамки простого соблюдения нормативных требований. Изменение начинается с проекта, проходит через ежедневную коммуникацию людей и машин и возвращается к изменениям в проекте после анализа инцидентов.

Рассмотренная динамическая модель, включающая активную, коммуникативную и реактивную фазы, позволяет горнорудным предприятиям

гибко реагировать на вызовы, связанные с изменчивостью природной среды и сложностью технологических процессов.

Ключевым преимуществом адаптивного подхода является создание замкнутых контуров обратной связи, которые преобразуют опыт инцидентов (как мелких, так и крупных) в улучшение проектных решений и операционных процедур.

Внедрение такой системы невозможно без развития открытой организационной культуры, поощряющей обмен информацией между всеми участниками производственного процесса – от рабочего у забоя до главного инженера. Только сочетание современных технологий мониторинга, профессиональных компетенций и эффективных коммуникаций способно обеспечить устойчивое снижение рисков и защиту персонала, имущества и окружающей среды в условиях горного производства.

Список литературы

1. Аленичев В.М. Идентификация техногенных рисков индустриального характера на горных предприятиях / В.М. Аленичев // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2023. № 1. – С. 90–100.
2. Коваленко В.В. Системный подход к управлению рисками: объединение стратегического управления и процессной интеграции с автономной системой / В.В. Коваленко, Г.А. Комендантов // Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. 2025. № 2 (53). – С. 98–105
3. Lofquist E.A. The art of measuring nothing: The paradox of measuring safety in a changing civil aviation industry using traditional safety metrics / E.A. Lofquist // Safety Science. 2010. Vol. 48 – Pp. 1520–1529
4. Systematic Review: Analysis of Factors Shaping Safety Culture in the Mining Industry / Rahayu S.Y., Novrikasari N., Hasyim H., Hasyim H. // Indonesian Journal of Global Health Research. 2024. Vol. 6(S6). – Pp. 909–916.
5. Rice C.M. Adaptive risk management in mining project development: a flexible approach to improve risk response / C.M. Rice. – Vancouver: University of British Columbia, 2021. – 288 pp
6. Mihajlovic I. Safety communication in mining companies: Differences across organizational structure / I. Mihajlovic // Journal of Engineering Management and Competitiveness. 2023. Vol. 13(1). – Pp. 30–36
7. Johannes J.C. Safety Always: How Communication Drives Compliance through Culture in High-risk Mining Company / J.C. Johannes, A. Etikariena, B. Carissa // Jurnal Penelitian Pendidikan Psikologi dan Kesehatan (J-P3K). 2025. Vol. 6(3). – Pp. 1159 – 1166

Смелова М.В.
аспирант
Российский биотехнологический университет
Россия, Москва,
rita.moskwa2004@mail.ru.
Леванова Т.А.
к.э.н., доцент кафедры «Управление бизнесом и сервисные технологии»
Российский биотехнологический университет
Россия, Москва,
levanovata@mgupp.ru.

ИННОВАЦИИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА ПИЩЕВОЙ (КОНДИТЕРСКОЙ) ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. В статье рассматривается планомерное развитие импортозамещения в стране от начала 21 века до современного этапа, проанализированы целевые правовые документы, выявлены современные условия импортозамещения в пищевой промышленности (на примере кондитерского производства) с учётом нововведений в экономике. Особое внимание уделено поддержке малого и среднего предпринимательства, наиболее зависимого от изменений во внешней среде. На основе анализа литературы оценена взаимосвязь и взаимовлияние маркетинговой среды (продвижения продукции) и процесса замещения товаров аналогичными отечественного производства – новыми российскими брендами. Сформулировано приоритетное направление в области качества пищевых изделий – соблюдение и развитие технических регламентов, маркировка продукции, обязательность внедрения «Честного знака» и его поддержка со стороны потребителей. Сделан вывод, что в 2026 году санкции не представляют собой угрозы или риски, они открывают новые возможности для импортозамещения и выполнения плана Президента страны.

Ключевые слова: Импортозамещение, менеджмент качества, продовольственная безопасность, развитие пищевой промышленности, кондитерское производство.

Smelova M. V.
Postgraduate Student
Russian Biotechnological University
Russia, Moscow
rita.moskwa2004@mail.ru
Levanova T.A.
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor Department of Business Management and Service Technologies
Russian Biotechnological University
Russia, Moscow
levanovata@mgupp.ru

IMPORT SUBSTITUTION INNOVATIONS AND PROSPECTIVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF FOOD (CONFECTIONERY) INDUSTRY QUALITY

Abstract. The article examines the systematic development of import substitution in the country from the beginning of the 21st century to the present stage, target legal documents were

analyzed, modern conditions for import substitution in the food industry have been identified (using the example of confectionery production) taking into account new features in the economy. Special attention is paid to supporting small and medium-sized businesses, which are most dependent on changes in the external environment. Based on the analysis of literature, the relationship and mutual influence of the marketing environment (product promotion) and the process of substitution goods with similar domestically produced – new Russian brands – were assessed. A priority area in the field of food product quality have been formulated: compliance with and development of technical regulations, product labeling, mandatory implementation of the «Honest Sign» and its support from consumers. It is concluded that in 2026, sanctions do not pose any threats or risks, but rather open up new opportunities for import substitution and the implementation of the country's President's plan.

Keywords: import substitution, quality management, food security, development food industry, confectionery production.

Российский рынок пищевой промышленности в текущем 2026 году характеризуется быстрым развитием импортозамещения. Внедрение новых российских IT-решений для организаций и производств находилось на уровне всего 25% в 2024 г., и 75% занимали зарубежные продукты. По итогам 2024 г., «в госсекторе в среднем лишь 43% инфраструктурных ИТ-решений создано российскими компаниями, а остальные 57% – наработки иностранных фирм» [3]. По итогам 2025 года (оценка Сбер-экосистемы), «около 55% предприятий уже используют отечественные технологические продукты» [5]. На текущий момент времени, импортозамещение уже повернулось от вынужденной концепции к осознанному добровольному стратегическому планированию на ближайшие десятилетия.

Ключевыми торговыми партнерами России на сегодняшний день являются Китай, Турция, Индия, Белоруссия и Казахстан [5]. Но кроме заключения договоров о вхождении продукции данных стран на российский рынок, серьёзно следует думать и о расширении сотрудничества в сторону выпуска и продажи на внешний рынок собственной продукции.

По настоящее время все приказы по импортозамещению федерального органа исполнительной власти – Министерства промышленности и торговли – способствуют достижению показателей из программы «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности» (утверждена 15 апреля 2014 г. Постановлением Правительства РФ № 328). Согласно документу, «импортозамещение – это процесс создания современных конкурентоспособных производств, направленный на замещение импортируемых в настоящее время товаров, как потребительских, так и производственных, принцип расстановки акцентов государственной промышленной политики, основанный на осознанном отказе от специализации в производстве только тех продуктов, в которых РФ имеет сравнительные преимущества перед другими странами в настоящее время» [6]. Процесс содержит в себе существенные изменения, тем более для такой капиталоемкой отрасли, как пищевая промышленность – приобретённое оборудование изнашивается, производству требуются сырьё, комплектующие детали и изделия, цифровые

свойства промышленных станков, холодильных, тепловых и упаковочных машин, it- решения.

«Как показал мировой опыт импортозамещения (конец XIX – начало XXI вв.) процесс избавления от импортозависимости следует рассматривать как начальную стадию решения проблемы конкурентоспособности экономики государства» [2].

Президент России В.В. Путин показал, что присоединившиеся к ограничениям страны добиваются внешнего политического давления, но экономических эффектов не будет: «Советский Союз действительно жил все время в условиях санкций, развивался и добивался колоссальных успехов. Санкции «времен СССР» сохранялись даже после 1990-х годов, а уже потом перешли в новейшие времена» [7].

Глобальный интерес государств к независимому выпуску продукции проявился после великого коллапса в США – мирового финансового кризиса 2008 г., принимались отдельные инициативы по самообеспечению и в России, началась поддержка малого бизнеса. Для розничной торговли причина освободиться от импортных товаров была объективна с 2000-х гг.

Основной – вынужденный – процесс импортозамещения в России берёт отсчёт с 2014 г., со дня введения ограничительных мер – санкций для военных и гражданских отраслей экономики от США, Европейского союза (ЕС), Канады, Швейцарии, Японии, Австралии, Новой Зеландии. Как показало время, прекращение сотрудничества и контактов в экономической сфере является неэффективным средством управления для всех сторон, наносит ущерб всей мировой экономике. В 2014 г., указом Президента РФ № 560 «О применении отдельных специальных экономических мер в целях обеспечения безопасности РФ» был запрещён или ограничен ввоз «отдельных видов сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, страной происхождения которых является государство, принявшее решение о введении экономических санкций в отношении российских юридических и (или) физических лиц или присоединившееся к такому решению» [13]. Меры, предусмотренные данным Указом, продлены. Попавший под запрет (эмбарго) импорт заменяется отечественной и дружественной продукцией (например, из Беларуси, Индии, Китая, азиатских и африканских стран).

В то же время утверждён «План содействия импортозамещению в промышленности» (дорожная карта) Распоряжением Правительства РФ от 30 сентября 2014 г. № 1936-р., что стимулирует научно-техническое развитие страны и рост высококвалифицированных мотивированных для работы на внутреннем рынке кадров. В перспективе конкурентная продукция может быть (и уже сейчас) востребована на международном рынке экспорта.

Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. N 488-ФЗ (ред. от 28 декабря 2025 г.) «О промышленной политике в РФ» (с изм. и доп., вступ. в силу с 28.12.2025г.), даёт интересующее нас определение промышленной продукции и перечисляет меры стимулирования деятельности, среди них: финансовая поддержка (в том числе, от Фонда развития промышленности в виде

займов, грантов, взносов в уставный капитал, финансовой аренды (лизинга), специального инвестиционного контракта), информационно-консультационная поддержка, научно-техническая поддержка осуществляемой деятельности, поддержка инноваций, поддержка кадров, поддержка внешнеэкономической активности, предоставление преференций.

«Отрасль промышленности – совокупность субъектов, осуществляющих деятельность в сфере промышленности, в рамках одной или нескольких классификационных группировок одного или нескольких видов экономической деятельности в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности»; «промышленная продукция – товары, произведенные в результате осуществления деятельности в сфере промышленности» [15].

Постановление от 17 декабря 2014 г. N 1388 (с изм. и доп. от 23 октября 2024 г.) «Об утверждении Правил предоставления из федерального бюджета субсидий федеральному государственному автономному учреждению «Российский фонд технологического развития» в целях стимулирования деятельности в сфере промышленности» служит финансовой поддержке субъектов деятельности промышленности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей.

Далее, в 2015 г. был издан приказ Минсвязи № 96 «Об утверждении плана по импортозамещению программного обеспечения». Были запрещены закупки для государственных и муниципальных нужд программного обеспечения, не включённого в данный «Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных».

Постановлением от 4 августа 2015 г. № 785 образована Правительственная комиссия по импортозамещению и утверждено положение о Комиссии (в настоящее время документ не действует). Распоряжение от 4 августа 2015 г. № 1492-р утверждало состав Правительственной Комиссии по импортозамещению (также утратило силу). Данная комиссия преобразована в Правительственную комиссию по промышленности Постановлением Правительства РФ № 1754 от 7 ноября 2025 г.

Федеральный закон «О мерах воздействия (противодействия) на недружественные действия Соединенных Штатов Америки и иных иностранных государств» от 04 июня 2018 г. № 127-ФЗ зеркален вводимым против России мерам, но имеет защитный и ограниченный характер.

В 2019 г. принято Постановление Правительства РФ № 878 от 10 июля «О мерах стимулирования производства радиоэлектронной продукции на территории России», которое призвано стимулировать закупку и наличие преимущества у российского оборудования. В 2021 г. 10 сентября были опубликованы Разъяснения Министерства промышленности и торговли РФ «По вопросам применения ПП РФ от 28 августа 2021 г. № 1432», где указаны требования к проведению закупок. При осуществлении государственных закупок и участии в тендерах ограничен доступ иностранных компаний

и российских компаний, аффилированных с иностранными постановлением Правительства РФ от 27 сентября 2025 года № 1478.

Исходя из Приказа Министерства промышленности и торговли РФ от

30 июля 2021 г. N 2882 «Об утверждении Плана мероприятий по импортозамещению в отрасли машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности РФ на период до 2024 г.», кондитерская и хлебопекарная промышленность, как и другие (молочная, мясная, винодельческая, продуктов детского питания), с 2021 г. нуждается в увеличении доли отечественного оборудования.

С 2015 г. разработанная «Программа стандартизации в области импортозамещения», положила начало повсеместному внедрению стандартов качества во исполнение Указа Президента РФ от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 г. и на перспективу до 2036 г.». Мы далее остановимся на маркировке сладостей «Честный знак». Система является следствием масштабного процесса контроля над массовым производством, логистикой и подлинностью товара, обеспечивает национальную безопасность в направлении пищевой промышленности.

«Помимо реализации отраслевых стратегий, потребуется обеспечение ускоренного технологического развития по таким ключевым, определяемым общими технологическими трендами и процессами формирования спроса межотраслевым направлениям, как: продовольственная безопасность» [8] и будет учитываться «опережающее развитие стандартизации и сертификации» [8].

Вторая волна объёмных пакетов антироссийских санкций началась в 2022 г. В 2023 г. была запущена Кластерная инвестиционная платформа для миллиардного финансирования крупных предприятий на условиях льготного кредитования проектов по импортозамещению. В приоритете финансирования – машиностроение для пищевой и перерабатывающей промышленности. На выпуск импортозамещающей продукции бизнесу можно оформить льготный займ Фонда развития промышленности (сформирован Распоряжением Председателя Правительства РФ от 28 августа 2014 г. № 1651).

При начале новой волны санкций остро встал вопрос о поставках не

Временных, альтернативных долгосрочных, о собственной сырьевой базе во всех секторах экономики. Торговое продвижение товаров из России в страны партнёров до сих пор затруднено, российские товары на мировом рынке не собирают нужные для развития экспортной политики внешние инвестиции.

Решение проблемы видится, в числе прочих, в следующем этапе после импортозамещения – в переходе к новым стандартам качества. Стандартизация и сертификация становятся трендами, заслуживающими доверие и у компаний, и у потребителей. В Москве существует учреждение, оказывающее методическую, образовательную и научную помощь по вопросам стандартизации – ФГБОУ ВО «Национальный институт стандартизации» совместно с органом исполнительной власти Росстандартом – Федеральным

агентством по техническому регулированию и метрологии. Сейчас процесс осуществляется в рамках действия документов: Плана мероприятий («дорожной карты») от 2019 г. развития стандартизации в РФ на период до 2027 года (План заменяет Концепцию развития национальной системы стандартизации РФ на период до 2020 г.), Федерального закона «О стандартизации в РФ от 29.06.2015 г. № 162-ФЗ (в ред. от 30.12.2020 г.), и – Постановления Правительства РФ от 31 мая 2025 г. № 818 «Об утверждении Правил маркировки отдельных видов сладостей и кондитерских изделий, упакованных в потребительскую упаковку, средствами идентификации и особенностях внедрения государственной информационной системы мониторинга за оборотом товаров, подлежащих обязательной маркировке средствами идентификации, в отношении отдельных видов сладостей и кондитерских изделий, упакованных в потребительскую упаковку». В числе приоритетов работы – массово вовлечь сам бизнес в разработку стандартов и маркировки.

Главными документами для обеспечения перспективного развития технологий в области качества пищевой продукции являются: Доктрина продовольственной безопасности РФ (утверждена Указом Президента РФ от 21 января 2020 года №20), Стратегия повышения качества пищевой продукции в РФ до 2030 года (утверждена 29 июня 2016 г. распоряжением Правительства РФ № 1364-р).

Обеспечению безопасности пищевой продукции и её качеству посвящён ГОСТ Р ИСО 22000-2007 «Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в цепи создания пищевой продукции». Аналогичную тематику имеет технический регламент Таможенного союза 021/2011 «О безопасности пищевой продукции». В регламенте отдельные требования безопасности касаются производства изделий из шоколада и имеющих в составе шоколад (Отдельные требования и идентификационные признаки, устанавливаемые для шоколада, шоколадных изделий, шоколадной глазури, шоколадной массы и какао-продуктов. Приложение 11) (дополнительно включено с 25 июля 2023 года решением Совета ЕЭК от 25 ноября 2022 года № 173) [11]. Прописаны микробиологические нормативы безопасности сахаристых кондитерских изделий, жевательной резинки, какао-продуктов, шоколада и шоколадных изделий, мучных кондитерских изделий, жиры специального назначения, в том числе кулинарные, кондитерские, хлебопекарные, маргарины, заменители молочного жира, эквиваленты масла какао, заменители масла какао нетемперируемые нелауринового и лауринового типов, смеси топлёные, спреды, кремы на растительных маслах. К кондитерским изделиям и сладостям относятся (Пункт 1.4 Приложения 2 к техническому регламенту Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011): «конфеты (глазированные и неглазированные), карамель неглазированная и глазированная, ирис, пастиломармеладные изделия, восточные сладости (в т.ч., типа кози-

нак, рахат-лукум, щербеты) и мучные восточные сладости (в т.ч., типа земелах), печенье (сахарное, с шоколадной глазурью, сдобное, затяжное, овсяное, с кремовой прослойкой, начинкой), пряники, коврижки, резинка жевательная, пасты, кремы, торты и пирожные (в т.ч., с отделками, без отделок, с отделками на основе маргаринов, растительных сливок и жиров), рулеты, торты вафельные с начинками и без начинок, кексы, вафли, халва глазированная и неглазированная, драже, шоколад с начинками и без начинок, с добавлениями и без добавлений, изделия из шоколада, плитки кондитерские, изделия диабетические, сахаристые и мучные изделия» [11].

Согласно международному стандарту ISO 9000:2015, «качество продукции и услуг организации определяется способностью удовлетворять потребителей и преднамеренным или непреднамеренным влиянием на соответствующие заинтересованные стороны. Качество продукции и услуг включает не только выполнение функций в соответствии с назначением и их характеристики, но также воспринимаемую ценность и выгоду для потребителя. Система менеджмента качества включает действия, с помощью которых организация устанавливает свои цели и определяет процессы и ресурсы, требуемые для достижения желаемых результатов. Система менеджмента качества управляет взаимодействующими процессами и ресурсами, требуемыми для обеспечения ценности и реализации результатов для соответствующих заинтересованных сторон» [10]. Качество продукции включает в себя таким образом: контроль санитарного состояния, анализы и измерения в лабораториях, контроль соблюдения условий хранения, сроков годности, целостности упаковки, соответствия маркировки стандартам – то есть, все этапы производства и продажи до покупки товара.

В соответствии с Федеральным законом № 29-ФЗ от 02.01.2000 г. «О качестве и безопасности пищевых продуктов», под качеством пищевых продуктов понимается «совокупность характеристик безопасных пищевых продуктов, отвечающих требованиям, установленным в соответствии с законодательством Российской Федерации, условиям договора, образцу, документам по стандартизации, технической документации, определяющим их потребительские свойства, пищевую ценность, аутентичность, сортность (калибр, категорию и иное), и удовлетворяющих физиологические потребности человека» [14], а пищевыми продуктами являются «(пищевая продукция, продовольственные товары, продукты питания) – продукты животного, растительного, микробиологического, минерального, искусственного или биотехнологического происхождения в натуральном, обработанном или переработанном виде, которые предназначены для употребления человеком в пищу» [14].

Отдельно упомянем обязательные актуальные требования технических регламентов Таможенного союза к упаковке пищевых продуктов, и потребительской упаковки для кондитерских изделий в частности. Так, ТР ТС 005/2011 «О безопасности упаковки» устанавливает оценки соответствия

упаковок, санитарно-гигиенические показатели безопасности, необходимости сертификации материалов, прямо контактирующих с продуктами питания. При контакте с продуктами, содержащими жиры и сахара, материалы не должны выделять вредные вещества, для этого и проводятся испытания [12].

Вследствие вышесказанного, логична маркировка всей кондитерской продукции с 1 марта 2026 года, завершаемая по плану к 1 июля 2026 г., когда будет охвачен весь ассортимент. «Маркировка будет обязательной как для фасованных изделий, так и для тех, что распространяются через розницу. Продукция должна быть промаркирована до отгрузки с производства или ввоза на территорию РФ – марки наносится с учётом кодов ТН ВЭД и ОКПД2» [4].

Покупатель через камеру своего мобильного устройства, скачав приложение «Честный знак», может отсканировать продукт и узнать производителя товара, дату выпуска, тем самым, подтвердить для себя его легальность и безопасность срока годности. Маркировке не подлежат товары на развес (например, карамель, конфеты), продукты весом до 20 гр. (батончики или шоколад в дольках), хлебные изделия со сроком годности до 30 суток. Данная продукция выводится из оборота с учётом веса в момент продажи. Таким образом, каждый товар учитывается и сохраняется в системе, куда направляется вся информация логистических цепочек от завода до кассы. Население для стимулирования прозрачности производственных цепочек также оказывает влияние на новый процесс, формируя требования к маркировке продуктов. Торговым сетям и контролирующим органам проще управлять продажами, т.к. в случае жалоб потребителей на низкое качество продукции, проблемы со здоровьем или при получении информации о небезопасных ингредиентах, вся партия изымается из оборота. Отзывы в приложении (например, сети «ВкусВилл») напрямую влияют на укрепление бренда или его отсутствие на полках. Маркировка товаров от небольших региональных производителей особенно вызывает лояльность аудитории, показывая, что проверки качества пройдены. Часто используя приложение «Честный знак», активист вытесняет недобросовестных ИП из оборота.

Если рассматривать структуру маркетинговой среды, которая очень важна в продвижении товара пищевого производства, то на все «элементы, субъекты и сферы, составляющие среду: предприятие, потребители, посредники по сбыту, поставщики и партнёры, конкуренты, природные условия, политико-правовые условия, демографические условия, социально-культурные условия, экономические условия, научно-технические условия» [9, с. 27] влияет процесс импортозамещения, процесс стандартизации качества, и микро, и макро – среды должны быть готовы к данному процессу. Нацеленность на импортозамещение может быть как сильной, так и слабой стороной производства, задача производителя – предложить покупателю конкурентные преимущества продукции. Анализ потенциала предприятия про-

водится по следующим направлениям [9, с. 28–32], (представим их в порядке убывания значимости): продукция, технология и оборудование, персонал, структура и система управления, имидж, финансовое состояние, научно-технический задел, сбыт продукции, система снабжения, затраты, маркетинг. Предлагаем по перечисленным составляющим изучать готовность к реализации инноваций импортозамещения, что при научном подходе станет катализатором улучшения деятельности предприятия.

Природные условия в России таковы, что выращивание какао-бобов для кондитерских изделий в настоящее время невозможно. Политико-правовые условия благоприятны для перехода всех предпринимателей к импортозамещению. Демографические условия, т.е. численность, структура и качественные характеристики населения воздействуют как на среду потребления, так и на производство пищевой продукции [9, с. 42]. Повышение рождаемости ведёт к увеличению продаж сладких изделий, также как мода на здоровый образ жизни – к тратам на протеиновые батончики, шоколад, фрукты в шоколаде, альтернативы без сахара или на сахарозаменителях. Социально-культурные условия страны сейчас отличает чувство патриотизма и рост национальной сопричастности к происходящему у всех традиционных народов, поведение населения переориентируется на отечественные бренды. Социально-экономические условия в масштабе страны зависят от колебаний показателя валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения, величин, характеризующих эффективность экономики (доходности, прибыльности, рентабельности, объёмом произведённой продукции, производительности труда, покупательской способности, и др.). Санкции стали стандартом политического, а не экономического манипулирования, и воспринимаются бизнесом со здоровой доли скептицизма. Научно-технические условия показывают нам уровень развития технологий, соотношение между повышением полученного эффекта к ресурсам, затраченным на покупку и ремонт оборудования.

Рассматриваемый вопрос будет актуален на перспективу, продукты питания как выгодная ниша для импортозамещения занимает первое место по оценкам экосистемы Сбера. «Внутреннее производство сейчас обеспечивает значительную долю основных продуктов питания. В частности, по данным Минсельхоза, по зерну самообеспеченность составляет 149%, по рыбе – 138%, сахару – 107%, мясу – 102%, а по растительным маслам и вовсе 252%. Однако по многим направлениям российской продукции не хватает, а сроки импортозамещения пока неясны.

Так, в 2024 году зарубежные поставки чая в Россию выросли на 58%. Иностранные производители занимают на этом рынке 60%. При этом его потребление растёт. Потенциально пригодных для выращивания чая земель в стране ещё много. В Краснодарском крае (лидирующий регион по производству чая) его выращивают на площади в 415 га, а неиспользуемая площадь составляет 800 га. Это открывает перспективы для развития политики

импортозамещения в секторе» [1]. Тем самым, динамика развития импортозамещения и формирования стандартов качества продукции наблюдается в целом длительно положительная, поступают новые предложения и проекты. Требуется активный контроль над процессами финансирования, полного цикла производства, упаковки и ценообразования.

Список литературы

1. Востребованные ниши для импортозамещения // СберПро: Медиа – исследование: сайт. URL: https://sber.pro/publication/vostrebovannie-nishi-dlya-importozamescheniya/. Дата обращения: 02.03.2026 г.
2. Гусева Т.А., Кершенбаум В.Я. Современные проблемы импортозамещения в НГК России. Методическое пособие для проведения практических занятий. М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2017. 20 с.
3. Импортозамещение: подводим итоги десятилетия. Обзор // Карта рынка. Российский рынок унифицированных коммуникаций: сайт. URL: https://www.cnews.ru/reviews/importozameshchenie_2024_itogi_i_plany/articles/importozameshchenie_podvodim_itogi. Дата обращения: 02.03.2026 г.
4. Маркировка сладостей Честный ЗНАК: актуальные изменения и правила 2026 года // Клеверенс – компания и программы для бизнеса: сайт. URL: https://www.cleverence.ru/articles/markirovka-tovarov/-markirovka-sladostey-chestnyy-znak-aktualnye-izmeneniya-i-pravila-2026-goda/. Дата обращения: 02.03.2026 г.
5. От импортозамещения до новых рынков: подводим итоги 2025 года в цифрах // РБК тренды. Общество – Последние новости дня в России и мире сегодня: сайт. URL: https://trends.rbc.ru/trends/social/cmrm/694122929a7947043558ef84. Дата обращения: 02.03.2026 г.
6. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» (с изм. и доп. на 29 декабря 2025 г. // Гарант.ру – информационно-правовое обеспечение: сайт. URL: https://base.garant.ru/70643464/. Дата обращения: 02.03.2026 г.
7. Путин заявил, что СССР всегда жил в условиях санкций и добивался успеха // РБК – последние новости дня. Новости политики в России и мире: сайт. URL: https://www.rbc.ru/politics/11/03/2022/622b33159a7947e05930bb9c/. Дата обращения: 02.03.2026 г.
8. Распоряжение Правительства РФ от 6 июня 2020 г. № 1512-р «Об утверждении Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года» (в ред. от 26 февраля 2026 г.) // КонсультантПлюс – справочно-правовая система: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354707/. Дата обращения: 02.03.2026 г.
9. Сердюкова Е.Я., Жуева А.Г. Маркетинг и менеджмент в пищевой промышленности: учебно-методическое пособие / Е.Я. Сердюкова, А.Г. Жуева; ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет им. Тараса Шевченко». Луганск: Книта, 2019. 216 с.
10. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь ISO 9000:2015. Москва Стандартинформ 2015. 53 с. Электронный ресурс. URL: https://urfu.ru/fileadmin/user_upload/common_files/standarts/GOST_R_ISO_9000-2015.pdf. Дата обращения: 02.03.2026 г.
11. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 О безопасности пищевой продукции (с изм. на 22 апреля 2024 года): утверждён Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт.
12. URL: https://docs.cntd.ru/document/902320560/. Дата обращения: 02.03.2026 г.

13. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 005/2011 О безопасности упаковки (с изм. на 6 сентября 2024 года): утверждён Решением Комиссии Таможенного союза от 16 августа 2011 г. № 769 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. URL: https://docs.cntd.ru/document/902299529/. Дата обращения: 02.03.2026 г.

14. Указ Президента РФ от 6 августа 2014 г. N 560 «О применении отдельных специальных экономических мер в целях обеспечения безопасности Российской Федерации» (с изм. и доп. от 18 сентября 2024 г.) // КонсультантПлюс – справочно-правовая система: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_166922/. Дата обращения: 02.03.2026 г.

15. Федеральный закон от 02 января 2000 года № 29-ФЗ (в ред. с изм. от 07.06.2025 г.) «О качестве и безопасности пищевых продуктов» // КонсультантПлюс – справочно-правовая система: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_25584/. Дата обращения: 02.03.2026 г.

16. Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. N 488-ФЗ (в ред. от 28 декабря 2025 г.) «О промышленной политике в РФ» // КонсультантПлюс – справочно-правовая система: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173119/. Дата обращения: 02.03.2026 г.

Павлов В.А.
студент
Краснодарский филиал РЭУ им. Г.В. Плеханова
Россия, Краснодар
vpavlov418@gmail.com
Прокопенко Р.В.
старший преподаватель кафедры «Товарной экспертизы, технологии торговли и ресторанного бизнеса»
Краснодарский филиал РЭУ им. Г.В. Плеханова
Россия, Краснодар
prokopenko.r.v.kfrea@mail.ru
Сергеева Е.Е.
студент
Херсонский государственный педагогический университет
Россия, Херсон
sergeevaee@kkutt.ru

ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НАЦИОНАЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЭНОГАСТРОНОМИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ

Аннотация. В статье исследуются институциональные инструменты управления качеством как драйвер развития эногастрономического кластера Краснодарского края. Предложена авторская модификация модели М. Портера, учитывающая влияние эндогенных институциональных факторов. На основе инверсивного подхода к диаграмме Исикавы выявлены детерминанты формирования качества национального продукта. Проанализированы меры господдержки, роль проекта «Винный гид России» и риски «институциональных ловушек» для малых виноделен.

Ключевые слова: институциональное управление, управление качеством, эногастрономический кластер, Краснодарский край, модель М. Портера.

Pavlov V.A.
Student
Krasnodar Branch of the Plekhanov Russian University of Economics
Russia, Krasnodar
vpavlov418@gmail.com
Prokopenko R.V.
Senior Lecturer of the Department of Commodity Expertise,
Trade Technology and Restaurant Business
Krasnodar Branch of the Plekhanov Russian University of Economics
Russia, Krasnodar
prokopenko.r.v.kfrea@mail.ru
Sergeeva E.E.
Student
Kherson State Pedagogical University
Russia, Kherson
sergeevaee@kkutt.ru

INSTITUTIONAL QUALITY MANAGEMENT TOOLS AS A FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF THE ENOGASTRONOMIC CLUSTER IN THE KRASNODAR TERRITORY

Abstract. The article explores institutional quality management tools as a driver for the development of the enogastronomic cluster in the Krasnodar Territory. The authors propose a modification of Michael Porter's model, incorporating the influence of endogenous institutional factors. Based on an inverse approach to the Ishikawa diagram, the determinants of national product quality formation are identified. The study analyzes state support measures, the role of the «Russian Wine Guide» project, and the risks of «institutional traps» for small-scale wineries.

Keywords: Institutional management, quality management, enogastronomic cluster, Krasnodar Territory, Michael Porter's model.

Российский рынок, как основа системы товарно-денежного распределения (эквивалентного обмена) благ, постоянно сталкивается с ситуацией мгновенного кризиса и нестабильности, особенно это заметно при рассмотрении отдельных его секторов. Наблюдаемая проблема складывается в первую очередь из совокупности внешних и внутренних взаимовлияющих факторов, а также равновесного ответа, источником которого выступает управленческий аппарат страны и отдельных компаний – игроков рынка. Именно управленческие решения являются предикатом успешного функционирования любой организационной структуры в рамках складывающейся объективной диспозиции.

В целом управление – это комплекс практик, процессов и правил, необходимых для принятия управленческих решений и достижения целей

компании. Они функционируют и деформируются под действием сложившихся обстоятельств и в совокупности с последними формируют отчетный уровень конкурентоспособности данной организационной структуры [3].

Используя инструменты стратегического анализа, прибегают к двум отдельным подходам в оценивании конкурентоспособности организации: отраслевому и ресурсному.

В рамках отраслевого подхода за основу принято считать внешние факторы, совокупно влияющие на деятельность организации (отраслевая структура, уровень конкуренции, производственные мощности и спрос).

При использовании ресурсного стратегического анализа, основой конкурентных преимуществ выступают индивидуализированные активы в виде внутренних ресурсов компании (человеческий, финансовый, культурологический ресурс).

Конечно, оба описанных подхода, даже при единовременном использовании обладают весомым недостатком – не используют институциональный контекст, который непременно складывается в рамках государственного и отраслевого механизма. Институции в данном случае это не только формальные, но и партикулярные установки, такие как государственная политика, правовые нормы, культурные особенности, обычаи и общественные устои [3].

Любые организации, их объединения и государства (социально-политические организации) в условиях глобализации и выхода на международный уровень просто обязаны вести учёт институциональных рамок для успешного стратегического планирования.

В рамках предложенной терминологической концепции экономические кластеры, сложившиеся на рынке РФ, могут быть рассмотрены, как динамические институализированные системы, функционирующие в соответствии с правилами теории конкурентных преимуществ Майкла Портера.

Несмотря на фундаментальность классического «ромба» М. Портера, современные реалии требуют включения в него институциональной составляющей как самостоятельного компонента. В рамках данной работы предлагается авторское расширение модели конкурентных преимуществ, где институциональная среда выступает не внешним фоном, а эндогенным (внутренним) фактором, определяющим качество и уникальность национального продукта.

Предлагаемая интеграция институционального контекста в модель М. Портера требует декомпозиции конкурентного потенциала на ряд ключевых составляющих. С точки зрения институционального анализа, жизнеспособность кластерной системы определяется эффективным взаимодействием следующих компонентов:

1. Нормативно-правового: законодательная база и механизмы нормотворчества.

2. Технико-технологического: система стандартов, регламентов и контроля качества.

3. Административного: государственная политика и инструменты прямой поддержки.

4. Социокультурного: традиции, терруарная идентичность и деловая этика.

5. Репутационного: уровень доверия социума и имидж региональных брендов.

Совокупное влияние данных факторов формирует основу для долгосрочного стратегического планирования.

Таким образом, стратегический анализ, учитывающий влияние институций и применяющий модель конкуренции Портера, предоставляет более полное понимание факторов, влияющих на конкурентный потенциал.

Особенно отчетливо необходимость учета институциональных рамок проявляется при анализе эногастрономического кластера в РФ.

Энотуризм – это специализированный вид туристской деятельности, представляющий собой временные выезды (путешествия) лиц в регионы с развитой культурой виноградарства и виноделия в познавательных и рекреационных целях, не связанных с получением дохода, направленный на комплексное восприятие региональной идентичности через изучение терруарных особенностей, традиций производства и потребления вина, а также их гармоничное сочетание с локальной гастрономией.

На самом деле, энотуристические направления в России и соответственно в Краснодарском крае, как самостоятельные виды туристических рекреационных мероприятий востребованы мало. Такая ситуация сложилась ввиду целого комплекса разнородных причин, часть из которых восходят к историко-политическому наследию нашей страны. Однако именно институциональный взгляд на стратегическое планирование и управление развитием данного незаменимого в своих рекреационных и финансовых смыслах сектора экономики может кардинально переменить сложившуюся ситуацию в лучшую сторону [1, 2].

В ходе более детального рассмотрения, становится ясно, что современное состояние эногастрономического сектора Краснодарского края характеризуется высокой степенью диверсификации и наличием уникального социокультурного капитала. Мультиэтнический состав населения региона (более 100 этнических групп) выступает в роли фундаментального нематериального актива кластера. Синергия кулинарных традиций Востока и Запада, базирующаяся на использовании локальной сельскохозяйственной продукции, формирует аутентичный культурный код территории [1]. Это позволяет рассматривать гастрономию Кубани не просто как дополнение к турпродукту, а как самостоятельный институциональный фактор, определяющий привлекательность региональной дестинации.

Производственное ядро кластера представлено более чем 40 винодельческими предприятиями, среди которых выделяются «якорные» игроки, задающие высокие стандарты качества на национальном уровне. К их числу относятся такие флагманы отрасли, как Русский винный дом «Абрау-

Дюрсо» (обладающий статусом официального поставщика государственного уровня), а также «Кубань-Вино», «Фанагория», «Мысхако», «Лефкадия» и другие. Функционирование данных предприятий в рамках единой институциональной среды обеспечивает трансляцию передового опыта и технологических инноваций по всей цепочке создания стоимости, от первичного виноградарства до высокоуровневого сервиса.

Интеграция производства и сферы услуг реализуется через механизмы специализированных винных маршрутов, которые трансформируют закрытый технологический цикл виноделен в открытый рекреационный продукт. Несмотря на растущую популярность подобных дестинаций среди внутреннего потребителя, экспертные оценки указывают на реализацию ресурсного потенциала региона лишь на уровне 40–50%. Данный «разрыв» между имеющейся сырьевой базой и уровнем развития туристической инфраструктуры свидетельствует о неиспользованной институциональной емкости кластера [1, 2].

В условиях актуальной экономической конъюнктуры интенсификация эногастрономического направления признана приоритетным вектором стратегического развития Краснодарского края [4, 5]. Ликвидация выявленного дефицита требует внедрения более совершенных механизмов координации и управления качеством, что позволит конвертировать природно-климатические и культурные детерминанты в устойчивое конкурентное преимущество регионального агропромышленного комплекса.

В отличие от традиционных промышленных объединений, эногастрономический туризм базируется на концепции терруара – категории, в которой природно-климатические факторы неразрывно связаны с культурно-историческими нормами и строгими правовыми регламентами (такими как системы защищённого географического указания и защищенного наименования места происхождения). Таким образом, управление качеством в данном секторе выходит за рамки чистого производства, трансформируясь в комплексный институциональный процесс координации между законодателем, производителем, территорией и потребителем. Именно этот симбиоз на примере Краснодарского края требует более детального рассмотрения через призму институционального анализа и инструментов государственного и отраслевого регулирования.

Для дескрипции предложенного институционального подхода и его адаптации к специфике эногастрономического кластера целесообразно использовать инструментарий классического менеджмента качества, в частности – метод причинно-следственного анализа (диаграмму Исикавы).

Однако в контексте развития национального бренда мы предлагаем отойти от традиционного поиска причин дефектов и сфокусироваться на инверсивной модели – выявлении ключевых факторов, формирующих эталонное качество продукции и услуг внутри кластера.

В данной модели институциональные факторы выступают в роли «горячих точек» – опорных узлов, воздействие на которые позволяет управлять

качеством не только отдельной единицы продукции, но и всей эногастрономической дестинации в целом. Например, блок «Технико-технологическое обеспечение» в условиях кубанского энотуризма трансформируется из чисто технологического процесса в строго регламентированный институциональный механизм защиты географических наименований. Это подтверждает тезис о том, что в кластерных системах качество является производной от эффективности взаимодействия государственных, правовых и культурных институтов.

На рисунке представлена авторская модель формирования качества в эногастрономическом кластере, построенная по принципу причинно-следственной диаграммы Каору Исикава.



Рис. Модель формирования качества в эногастрономическом кластере

Хочется также сказать, что на данный момент уже создан общий «скелетный» базис для полноценного развития региона в «туристическую Мекку», однако сам по себе этот базис не достаточен без выделенного драйвера, который запускает путь к развитию. Более того сегодня это развитие завершает стадию стихийного роста, переходя к системному институциональному строительству, где ключевая роль в синергии частных инициатив и государственного регулирования [1, 2].

Крупнейшие винодельческие хозяйства региона (такие как «Абрау-Дюрсо», «Фанагория», «Шато де Талю») реализуют собственные масштабные программы развития гостеприимства, инвестируя в создание полноценных рекреационных комплексов, отелей и гастрономических школ. Эти корпоративные усилия поддерживаются жестким законодательным каркасом – Федеральный закон № 468-ФЗ не только защищает территориальные бренды через систему ЗГУ и ЗНМПТ, но и формирует условия для «прозрачности» производства [5].

В рамках программы «Сделано в России» региональные винные маршруты интегрируются в национальную систему продвижения, что позволяет снизить косвенные и сопряжённые затраты туриста при выборе дестинации и гарантирует аутентичность предлагаемого продукта [4].

Проект «Винный гид России», реализуемый Роскачеством совместно с профильными министерствами, это важный инструмент независимого ежегодного контроля и пиара продукции отрасли. Этот проект представляет собой масштабный аудит отрасли, в рамках которого исследуют виноградники и хозяйства на территории более чем 40 тысяч гектаров. Оценку проводят по более чем 100 критериям – от сырьевой базы до туристической инфраструктуры. Исследование базируется на строгих международных стандартах (шкала OIV), на межгосударственных и национальных стандартах. При этом Роскачество пользуется повышенным порогом качества, формируя «золотой стандарт» для потребителя. Публикация ежегодных рейтингов и «бренд-листов» доступных вин в сочетании с экспертными экспедициями по винным дорогам создает единое информационное поле, которое верифицирует качество национального продукта и стимулирует виноделов к постоянному самосовершенствованию.

Несмотря на позитивную динамику, чрезмерное государственное регулирование отрасли таит в себе риск формирования так называемой «институциональной ловушки». Данный феномен возникает в ситуации, когда избыточная бюрократизация и жесткие лицензионные требования, изначально разработанные для крупных промышленных холдингов, становятся непреодолимым барьером для малых форм хозяйствования (КФХ).

Малый винодел на каждом этапе производственного предреализационного цикла сталкивается со сложностями с легализацией, что сопрягается с большими издержками, превышающими потенциальную прибыль.

Так, например, выдача лицензии для реализации алкоголесодержащей продукции производит Федеральная служба по регулированию алкогольного рынка (РАР) в соответствии со строгими требованиями Федерального закона от 22.11.1995 171-ФЗ «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции», что является препятствием к достижению свободного конкурентного рынка среди таких гигантов-монополистов твердо занимающих свои рыночные позиции.

Все это тормозит развитие авторского виноделия и локальных гастротуров в малых хозяйствах, которые могли бы обеспечить кластеру необходимую гибкость и аутентичность. Таким образом, институциональная среда должна стремиться к дифференциации подходов, чтобы «правила игры» не превращались в фильтр, отсекающий малых игроков от легального рынка.

Для достижения полной проектной мощности кластера необходимо сфокусироваться на следующих приоритетных направлениях:

1. Кадровый дефицит. Острая нехватка энологов, виноградарей и специализированных гидов требует системного институционального ответа. Решением может стать создание и расширение целевых образовательных программ на базе ведущих региональных вузов (например, ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, ФГБОУ ВО «КубГТУ») и профильных колледжей (ГБПОУ

КК АСТ), интегрированных непосредственно в производственные процессы виноделен.

2. Экологизация производства. Внедрение «зеленых стандартов» и поддержка органического виноградарства станут важным фактором привлечения осознанного туриста и повышения качества национального продукта.

3. Цифровая трансформация. Создание единой региональной платформы-агрегатора для винных дорог позволит объединить разрозненные маршруты в общую экосистему, упростив навигацию и бронирование для туриста, что существенно снизит информационные барьеры.

Подводя итог, следует подчеркнуть, что именно институциональное управление качеством выступает тем катализатором, который способен трансформировать Краснодарский край из традиционной «сырьевой базы» в эногастрономический регион мирового уровня.

Синтез расширенной модели Портера, инверсивного подхода Исикавы и мер государственной поддержки формирует устойчивый каркас, где качество продукции подтверждается не только протоколами лабораторных испытаний, но и доверием социума. Создание такой динамической системы гарантирует, что кубанский терруар станет не просто географической точкой на карте, а признанным эталоном на глобальном рынке эногастрономических услуг.

Список литературы

1. Гайтян К.Л., Жертовская Е.В. Эногастрономический туризм в Краснодарском крае: Развитие и продвижение в SMM // Материалы XIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» URL: https://scienceforum.ru/2021/article/2018025478 (дата обращения: 22.01.2026).
2. Горошко Н. В., Пацала С. В. ГАСТРОНОМИЧЕСКИЙ БРЕНД КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ГАСТРОНОМИЧЕСКОГО ТУРИЗМА // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2022. №4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gastronomicheskiy-brend-kak-instrument-razvitiya-regionalnogo-gastronomicheskogo-turizma (дата обращения: 22.01.2026).
3. Лазаренко, В. Е. О перспективах институциональной методологии экономико-теоретического анализа традиционных хозяйственных систем / В. Е. Лазаренко // Экономика. Общество. Человек : межвузовский сборник научных трудов. Том Выпуск XXVII. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 92–97. – EDN XVMKAX.
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 26 февраля 2025 г. № 450-р Об утверждении Программы по продвижению российской продукции за рубежом под национальным брендом «Сделано в России» на период до 2030 г. [Электронный ресурс]. – Доступ из системы ГАРАНТ // ЭПС «Система ГАРАНТ» : Мобильный ГАРАНТ онлайн. Интернет-версия / НПП «ГАРАНТ-СЕРВИС-УНИВЕРСИТЕТ». URL: http://internet.garant.ru (дата обращения: 26.01.2026).
5. Федеральный закон «О виноградарстве и виноделии в Российской Федерации» от 27.12.2019 N 468-ФЗ [Электронный ресурс]. – Доступ из системы ГАРАНТ // ЭПС «Система ГАРАНТ» : Мобильный ГАРАНТ онлайн. Интернет-версия / НПП «ГАРАНТ-СЕРВИС-УНИВЕРСИТЕТ». URL: http://internet.garant.ru (дата обращения: 24.01.2026).

Голикова Е.В.
студент
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, Нижний Новгород
katya.golikova.2003@gmail.com
Вопилин В.В.
к.п.н., доцент кафедры «Менеджмент»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, Нижний Новгород

КАК ПОСТРОИТЬ СИСТЕМУ МОТИВАЦИИ ДЛЯ СОТРУДНИКОВ РАЗНЫХ ПОКОЛЕНИЙ (ОТ БУМЕРОВ ДО ЗУМЕРОВ)

Аннотация. В статье рассматривается, как менялись подходы к мотивации труда в условиях, когда в одной компании работают представители четырех поколений. Анализируются типы поколений по теории Штрауса и Хау, приводятся данные последних исследований о мотивационных движущих силах для зумеров, миллениалов, иксов и бумеров. Цель работы – предложить службам по управлению персоналом практический способ создания опросного листа, который позволит выявить личные мотивы каждого сотрудника, не упрощая и не искажая реальную картину.

Ключевые слова: теория поколений; мотивация персонала; бэби-бумеры; поколение X; миллениалы; поколение Z; управление персоналом; кадровая анкета; мотивационные драйверы; корпоративные льготы; психология труда.

Golikova E.V.
Student
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev
Russia, Nizhny Novgorod
katya.golikova.2003@gmail.com
Vopilin V.V.
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
of the Department of Management,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev
Russia, Nizhny Novgorod

HOW TO BUILD A MOTIVATION SYSTEM FOR EMPLOYEES OF DIFFERENT GENERATIONS (FROM BOOMERS TO ZOOMERS)

Abstract. The article examines how approaches to labor motivation have changed in conditions when representatives of four generations work in one company. The author analyzes the types of generations according to the theory of Strauss and Howe, and provides data from the latest research on motivational driving forces for zoomers, millennials, X's, and boomers. The purpose of the work is to offer personnel management services a practical way to create a questionnaire that will identify the personal motives of each employee without simplifying or distorting the real picture.

Keywords: theory of generations; staff motivation; baby boomers; Generation X; millennials; Generation Z; personnel management; personnel questionnaire; motivational drivers; corporate benefits; Psychology of work.

Названия поколений, которые мы сегодня используем, были введины американскими исследователями Уильям Штраус и Нил Хау, которые изучали историю как повторяющиеся циклы. Они заметили: каждые 80–90 лет в обществе сменяются четыре типа людей, чьи ценности закладываются в детстве – в моменты больших событий (войн, кризисов или, наоборот, экономических подъемов).

Бэби-бумеры (1946–1964 годы рождения). Их название происходит от английского словосочетания baby boom («взрыв рождаемости»). После Второй мировой войны во многих странах мира резко выросло число новорожденных. Это поколение Штраус и Хау назвали «Пророками»: они выросли в эпоху процветания и верят, что могут изменить мир к лучшему [1; 5].

Поколение X (1965–1980 годы рождения). Название закрепилось после романа Дугласа Коупленда «Поколение X». Штраус и Хау назвали их «Странниками»: они выросли во времена, когда старые социальные институты рушились, поэтому они привыкли полагаться только на себя, прагматичны и недоверчивы к громким обещаниям [2].

Миллениалы, или поколение Y (1981–1996 годы рождения). Название связано с рубежом тысячелетий (millennium – тысячелетие). Эти люди заканчивали школу или начинали работать на стыке XX и XXI веков. В теории Штрауса и Хау они получили роль «Героев» – защитников коллективных ценностей и командной работы [2].

Поколение Z (1997–2012 годы рождения). «Зумеры» – это просто краткое произносимое имя для поколения Z. По Штраусу и Хау, они вырастают в фазу «Кризиса» и получают роль «Художников»: их задача – выживать, приспосабливаться и перестраивать мир, доставшийся от предыдущих поколений [1].

Таким образом, названия отражают не просто годы жизни, а социальную роль, которую каждое поколение играет в истории.

Мотивация не бывает раз и навсегда заданной, она меняется вместе с человеком и с эпохой. Современные исследования (опросы Русской школы управления, диссертационные работы зарубежных университетов) позволяют выделить четыре портрета [7; 8].

Зумеры (1997–2012 годы рождения): «Цифровые прагматики» Для человека этого поколения работа – не смысл жизни, а средство для жизни. По данным 2025 года, главные причины, по которым зумер уходит из компании, – это жесткий контроль (70% опрошенных) и отсутствие возможности выбирать график (отсутствие гибкости) [8].

Движущая сила: свобода + защищенность. Зумер хочет стабильности, но без принуждения и постоянного надзора. Ему важно, чтобы техника (компьютеры, программы) была современной и не тормозила работу [3].

Миллениалы (1981–1996 годы рождения): «Амбициозные, но уставшие». Они готовы работать много, но при одном условии: они должны видеть смысл в том, что делают. В 2025 году исследователи зафиксировали, что 63% миллениалов уходят из-за эмоционального выгорания, при этом 76% называют высокую зарплату важным, но не единственным условием [8].

Движущая сила: равновесие + смысл. Если работа начинает разрушать семью или здоровье, миллениал уходит, даже теряя в деньгах [7].

Поколение X (1965–1980 годы рождения): «Стабильные и умелые» Иксы – это люди, которые жили без интернета, застали перестройку и научились выживать в любых условиях. Они ценят уважение к своему опыту и самостоятельность. Для них перегрузки на работе – это привычная норма, но только если зарплата позволяет копить и чувствовать себя спокойно [7].

Движущая сила: самостоятельность + уважение. Им важны не только деньги, но и комфортные условия, а также признание их экспертизы.

Бэби-бумеры (1946–1964 годы рождения): «Преданные делу» Для бумера работа – это часть его личности. Он держится за место, если чувствует, что его ценят и уважают. Исследования показывают: бумеры уходят не из-за сложности задач, а из-за ссор в коллективе (токсичной атмосферы) или отмены привычных льгот [4].

Движущая сила: уважение к опыту + спокойствие. Бумеру важно, чтобы к нему прислушивались и чтобы компания заботилась о нем через понятные и надежные льготы (полис добровольного медицинского страхования, уважительное отношение к ветеранам).

Самая частая ошибка службы персонала – задавать прямые вопросы: «Вам важна зарплата?» или «Вы хотите премию?». На такие вопросы любой человек ответит «да», но это ничего не скажет о его настоящей мотивации. Чтобы получить правдивые данные от бумеров, иксов, миллениалов и зумеров одновременно, анкета должна быть устроена как выбор предпочтений.

Ниже приведена готовая структура опросного листа (табл.). Сотруднику предлагается оценить каждый пункт по шкале от 1 до 5, где:

1 – «совершенно не важно для меня»;

3 – «средне, могу без этого обойтись»;

5 – «это критически важно, без этого я не буду работать с полной отдачей».

Следствие первое (о приоритетах). Прямой вопрос о размере оплаты труда не позволяет выявить истинные мотивы сотрудника. Анализ ответов в блоках «Признание и развитие» и «Деньги и льготы» показывает: для зумера критически значима свобода (гибкий график, отсутствие жесткого контроля), тогда как для бумера – стабильность и общественное признание (уважение к ветеранам, расширенная страховка).

Следствие второе (о недопустимости усреднения). Усреднение предпочтений разных поколений (например, введение «половинчатой» удаленной работы для всех) приводит к демотивации как зумеров (не получивших желаемой свободы), так и бумеров (вынужденных работать в некомфортном для них удаленном формате). Единственное решение – внедрение индивидуального «меню льгот», где каждый сотрудник самостоятельно выбирает два-три наиболее значимых для него бонуса.

Таблица

Структура опросного листа для выявления мотивационных предпочтений с отрудников разных поколений

Блок А. «Режим и обстановка» (этот блок особенно важен для зумеров и миллениалов)	
Что предлагается сотруднику	Пример вопроса в анкете
Свободное начало и окончание рабочего дня (гибкий график)	«Я могу начинать работу с 8 до 11 утра, а заканчивать с 17 до 20 вечера – как мне удобно»
Возможность работать из дома (удаленная работа)	«Мне разрешено работать не в офисе, а из дома несколько дней в неделю»
Блок Б. «Деньги и льготы» (особенно важен для поколения Х и для бумеров)	
Что предлагается сотруднику	Пример вопроса в анкете
Понятные правила начисления премии	«Я точно знаю, за какой результат мне начислят премию, и могу это заранее посчитать»
Полис добровольного медицинского страхования (включая стоматологию)	«Компания оплачивает мою страховку, включая лечение зубов и обследования»
Блок В. «Признание и развитие» (важен для всех, но по-разному)	
Что предлагается сотруднику	Пример вопроса в анкете
Публичная похвала от руководителя	«Мой начальник говорит спасибо лично мне при всех на общем собрании»
Статус «эксперт» или доска почёта	«В компании есть звание «Лучший сотрудник года» или стенд с фотографиями отличившихся работников»
Блок Г. «Атмосфера и контроль» (здесь мнения расходятся сильнее всего)	
Что предлагается сотруднику	Пример вопроса в анкете
Мало совещаний, больше работы	«Совещания длятся не дольше 15 минут, и их не больше двух в день»
Нет мелочной проверки каждого шага (нет микроконтроля)	«Руководитель проверяет только конечный результат, а не то, как я сижу за столом»

Следствие третье (о динамике ценностей). Мотивационные предпочтения поколений не являются неизменными. Ценности зумеров, в отличие от бумеров, подвержены быстрым изменениям. Следовательно, анкетирование необходимо проводить не реже одного раза в два года. В противном случае

система мотивации перестанет соответствовать реальным ожиданиям сотрудников.

Эффективная мотивация сегодня – это отказ от единого шаблона и переход к индивидуальному подходу. Понимание того, почему Штраус и Хау назвали бумеров «пророками», а зумеров «художниками», помогает руководителю перестать обижаться на «неблагодарную молодёжь» и перестать считать пожилых сотрудников «консервативными помехами». Предложенный выше опросный лист – это простой и дешёвый инструмент, который позволит вам увидеть: каждый сотрудник хочет работать хорошо, просто причины для этого у всех разные. Используйте эту анкету, и вы получите не догадки, а точные данные для принятия решений.

Список литературы

1. Русская Школа Управления. Зумеры бегут от контроля, миллениалы – от выгорания: главные причины увольнений для каждого поколения [Электронный ресурс] // The HRD. – 2025. – 20 октября. – Режим доступа: https://thehrd.ru/news/zumery-begut-ot-kontrolya-millenialy-ot-vygoraniya-glavnye-prichiny-uvolneniy-dlya-kazhdogo-pokoleniya/ (дата обращения: 22.04.2026).
2. Русская Школа Управления. Главная проблема многопоколенческих команд – цифровой разрыв [Электронный ресурс] // Retail.ru. – 2025. – 23 октября. – Режим доступа: https://www.retail.ru/rbc/pressreleases/glavnaya-problema-mnogopokolencheskikh-komand-tsifrovoy-razryv/ (дата обращения: 22.04.2026).
3. Howe N. Millennials Rising: The Next Great Generation [Электронный ресурс] / N. Howe, W. Strauss. – New York: Vintage Books, 2000. – 432 p. – Режим доступа: https://books.google.ru/books/about/Millennials_Rising.html?id=vmNkJ9oYc2IC (дата обращения: 22.04.2026).
4. Strauss W. Generations: The History of America's Future, 1584 to 2069 / W. Strauss, N. Howe. – New York: William Morrow & Co, 1991. – 538 p. – ISBN 0-688-08133-9.
5. Михайлова В. Почему мы всегда будем разными? Разбираемся в теории поколений [Электронный ресурс] // Первая линия (СПбГУ). – 2024. – 13 декабря. – Режим доступа: https://1-line.spbu.ru/tajmkiller/236-2291.html?grp=2 (дата обращения: 22.04.2026).
6. Выборов С. Теория поколений, или Какой медведь правильный: белый или бурый [Электронный ресурс] // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2025. – 21 сентября. – Режим доступа: https://elektriknews.ru/ru/home/rubriki/nauka/teoriya-pokoleni-ili-kakoj-medved-pravilnyj-bely-ili-bury (дата обращения: 22.04.2026).
7. Naked Science. «А вот мы в ваши годы»: бумер, зумер и миллениал [Электронный ресурс]. – 2020. – 19 декабря. – Режим доступа: https://naked-science.ru/article/psy/bumer (дата обращения: 22.04.2026).

Голикова Е.В.
студент
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, Нижний Новгород
katya.golikova.2003@gmail.com
Вопилин В.В.
к.п.н., доцент кафедры «Менеджмент»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, Нижний Новгород

КАК РЫНОЧНАЯ СТОИМОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПРЕДПРИЯТИЯ ЗАВИСЯТ ОТ ВЛОЖЕНИЙ В ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ КАПИТАЛ

Аннотация. В экономике интеллектуальных ресурсов и при дефиците квалифицированных кадров человеческий капитал становится ключевым источником долгосрочных конкурентных преимуществ организации. Данные отечественной и зарубежной статистики подтверждают устойчивую связь между качеством управления персоналом и финансовыми результатами предприятия. Целевые инвестиции в обучение, повышение вовлечённости сотрудников и рост выручки на одного работника закономерно ведут к увеличению рыночной стоимости бизнеса. В статье представлены расчётные показатели отдачи от кадровых вложений.

Ключевые слова: человеческий капитал, результативность персонала, закрепляемость кадров, рыночная стоимость предприятия.

Golikova E.V.
Student
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev
Russia, Nizhny Novgorod
Vopilin V.V.
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor
of the Department of Management,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev
Russia, Nizhny Novgorod
katya.golikova.2003@gmail.com

HOW THE MARKET VALUE AND EFFICIENCY OF THE ENTERPRISE DEPEND ON INVESTMENTS IN HUMAN CAPITAL

Abstract. In the economy of intellectual resources and with a shortage of qualified personnel, human capital is becoming a key source of long-term competitive advantages of the organization. Domestic and foreign statistics confirm a stable relationship between the quality of personnel management and the financial results of the enterprise. Targeted investments in training, increasing employee engagement and revenue growth per employee naturally lead to an increase in the market value of the business. The article presents the estimated indicators of return on personnel investments.

Keywords: human capital, personnel efficiency, personnel retention, output per employee, market value of the enterprise.

Смена технологических эпох требует пересмотра привычных взглядов на то, что движет экономическим ростом. Материальные фонды и движение денег больше не считаются единственными инструментами расширения деятельности. В современной науке об управлении всё острее встаёт задача количественного измерения неосязаемых активов, среди которых ключевое место принадлежит человеческому капиталу. Раньше кадровые службы нередко воспринимались как источники издержек, однако новые исследования, опирающиеся на наблюдаемые данные, опровергают такое представление. Цель настоящей работы – на основе актуальных статистических материалов доказать, что более эффективное использование человеческого капитала напрямую ускоряет расширение хозяйственной деятельности и повышает прибыльность предприятия.

В целях формирования репрезентативной доказательной базы, отвечающей критериям внутренней валидности и воспроизводимости результатов, в настоящем исследовании был задействован комплекс источников эмпирических данных, структурированный по трём аналитическим направлениям. К первому направлению отнесены макроэкономические показатели, характеризующие динамику и структуру роста предприятий, демонстрирующих устойчиво высокие темпы развития. Второе направление составили отраслевые примеры (в том числе управленческие кейсы) хозяйствующих субъектов, внедривших системы управления человеческим капиталом, что позволило зафиксировать причинно-следственные связи между применением подобных систем и результатами деятельности. Третье направление включило расчётные данные об экономической эффективности инвестиций в персонал, выраженные через показатели возврата на вложенные средства и прирост производительности труда.

Сотрудники Института менеджмента инноваций, функционирующего в структуре Высшей школы бизнеса Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», на основании обработки данных налоговой отчётности 1,4 миллиона российских организаций выявили ключевую закономерность: основным драйвером экономического развития выступают предприятия, демонстрирующие ежегодное увеличение выручки более чем на 20%. За временной промежуток 2021–2024 годов именно такие хозяйствующие субъекты обеспечили 73% совокупного прироста доходов всего российского бизнеса, что в абсолютном выражении составило 21,5 триллиона рублей из 29,6 триллиона рублей [5].

Решающим фактором, обусловившим лидерство указанных компаний, явилась выработка на одного занятого – обобщающий показатель, отражающий объём добавленной стоимости, создаваемой за единицу рабочего времени. Величина данного показателя находится в прямой зависимости от накопленного работниками запаса знаний, навыков и профессиональных компетенций. В фирмах-лидерах выработка на одного занятого возросла почти двукратно – с 6,5 миллиона до 11,5 миллиона рублей в год, при этом

среднегодовой темп прироста достиг 21%. Для сопоставления: в среднем по всему рынку аналогичный показатель увеличился лишь на 3% [5].

Для наглядного представления описанных выше эмпирических закономерностей ниже приводится таблица, систематизирующая ключевые статистические показатели, характеризующие вклад быстрорастущих компаний в экономическое развитие Российской Федерации в период 2021–2024 годов. Сравнительный анализ позволяет количественно оценить разрыв в динамике производительности труда между компаниями-лидерами и среднерыночными значениями.

Таблица

Сравнительные показатели деятельности быстрорастущих компаний и среднерыночных значений за 2021–2024 гг. [5]

Показатель	Компании-лидеры (ежегодный прирост выручки >20%)	Средние значения по рынку
Доля в общем приросте выручки российского бизнеса	73%	27%
Абсолютный вклад в прирост выручки, трлн руб.	21,5	8,1
Общий прирост выручки российского бизнеса, трлн руб.	29,6 (совокупно по всем компаниям)	29,6 (совокупно по всем компаниям)
Выработка на одного занятого на начало периода (2021 г.), млн руб./год	6,5	6,5
Выработка на одного занятого на конец периода (2024 г.), млн руб./год	11,5	6,7
Среднегодовой темп прироста выработки,%	21%	3%
Кратность роста выработки	1,77	1,03

Представленные в таблице статистические данные позволяют сделать следующие обоснованные выводы.

Во-первых, наблюдается выраженная асимметрия в распределении прироста совокупной выручки: на долю компаний с ежегодным темпом роста более 20% приходится почти три четверти (73%) общего увеличения доходов российского бизнеса, тогда как все остальные организации обеспечивают ллишь оставшиеся 27%. Данный факт свидетельствует о том, что экономический рост в Российской Федерации в рассматриваемый период носил характер «поляризованного» или «лидерского» развития, при котором основные макроэкономические эффекты создаются относительно небольшой группой высоко динамичных предприятий.

Во-вторых, выявлен значительный разрыв в динамике производительности труда между двумя группами сравнения. Если в компаниях-лидерах выработка на одного занятого увеличилась практически вдвое (среднегодовой темп прироста 21%), то в среднем по рынку прирост составил лишь 3% – что сопоставимо с темпами статистической погрешности или незначительной корректировки. Разница в семь раз (21% против 3%) указывает на принципиально различную модель использования трудовых ресурсов: в быстрорастущих фирмах человеческий капитал выступает как фактор интенсивного роста, тогда как в остальных организациях его влияние на производственные результаты остаётся минимальным.

В-третьих, с теоретической точки зрения, полученные результаты подтверждают гипотезу о существовании кумулятивного эффекта накопленного человеческого капитала. Прирост выработки на 21% в год означает, что компании-лидеры не просто экстенсивно наращивают численность занятых, а качественно повышают отдачу от каждого работника. Поскольку производительность труда, как указано в исходном определении, зависит от запаса знаний и умений сотрудников, можно утверждать, что именно целенаправленные инвестиции в развитие человеческого капитала (обучение, мотивация, вовлечённость, организационное обучение) обеспечили этим предприятиям устойчивое конкурентное преимущество и возможность генерировать непропорционально большую долю совокупного экономического прироста [5].

Таким образом, эмпирические данные однозначно свидетельствуют о том, что управление производительностью труда через повышение качественных характеристик рабочей силы является ключевым фактором масштабирования бизнеса и главным источником дифференциации между быстрорастущими и среднестатическими компаниями. В практическом менеджменте это означает необходимость переориентации кадровой политики с логики минимизации затрат на персонал на логику максимизации отдачи от человеческого капитала.

Расчёт денежной отдачи от вложений в персонал постепенно становится обязательной частью публичной отчётности корпораций. Согласно проекту, запущенному организацией «Дейфорс» и выполненному аналитическим агентством «Форрестер Консалтинг», внедрение объединённых цифровых платформ для управления человеческим капиталом приносит 176% возврата на вложенные средства со сроком окупаемости менее полугода. В абсолютных величинах чистая приведённая стоимость положительного эффекта за три года достигла 6,8 миллиона долларов. Указанный результат получен главным образом за счёт сокращения текучести кадров на 20% и уменьшения временных и денежных затрат на выполнение повседневных административных операций в сфере работы с персоналом [2,3,4]. Показатель возврата на вложенные средства применительно к человеческому капиталу вычисляется как отношение чистой прибыли, полученной благодаря мероприятиям по работе с персоналом, к общей сумме затрат на

эти мероприятия. Снижение уровня увольнений позволяет свести к минимуму издержки на замещение освободившихся должностей, которые, по оценкам, основанным на наблюдениях, для квалифицированных кадров могут достигать полутора-двух годовых окладов.

Данные, полученные на российском рынке недвижимости (на примере девелоперской компании «ОКСЕ КАПИТАЛ»), подтверждают следующую закономерность. Если компания систематически вкладывает средства в построение понятных карьерных маршрутов для сотрудников и в развитие внутренней культуры, то уровень удержания ключевых специалистов достигает 92%. Это, в свою очередь, даёт два измеримых бизнес-эффекта:

во-первых, удовлетворённость покупателей возрастает на 35%;

во-вторых, время адаптации новых работников сокращается на 40% [1].

Иными словами, инвестиции в человеческий капитал через повышение лояльности персонала напрямую улучшают клиентский опыт и ускоряют ввод новичков в рабочие процессы.

Качество рабочей силы определяется тремя ключевыми характеристиками:

уровнем профессиональной квалификации;

силой внутренней (внутренне обусловленной) мотивации;

глубиной психологической вовлечённости сотрудника в дела организации.

Развитие этих качеств создаёт условия для расширения предпринимательской деятельности по трём основным направлениям:

Направление снижения операционных издержек. Затраты организации на подбор, оформление и адаптацию нового сотрудника взамен выбывшего сопоставимы с величиной его годовой заработной платы. Сокращение текучести кадров с 20% до 10% автоматически высвобождает финансовые ресурсы, которые могут быть перенаправлены на освоение новых видов деятельности. Иными словами, удержание персонала позволяет предприятию не тратить средства на «закрытие позиций», а инвестировать их в развитие.

Направление стимулирования инновационной активности. Предприятия, наиболее рационально использующие человеческий капитал, выводят на рынок новые товары и услуги с меньшими временными затратами по сравнению с конкурентами. Как подчёркивается в исследовании Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», именно высокотехнологичные быстрорастущие фирмы (так называемые «технологические газели») обеспечили структурные сдвиги в российской экономике, сосредоточив в себе 17% от общей численности занятых [5]. Таким образом, эффективное управление знаниями и компетенциями сотрудников напрямую ускоряет инновационный процесс.

Направление укрепления репутации работодателя и рост лояльности клиентов. Лояльные, преданные компании сотрудники закономерно формируют приверженность со стороны покупателей. В рассмотренном выше примере девелоперской компании «ОКСЕ КАПИТАЛ» внедрение карьерных

маршрутов и системы наставничества привело к увеличению удовлетворённости клиентов на 35% [1]. Данный эффект объясняется просто: удовлетворённый сотрудник качественнее выполняет свои обязанности, внимательнее относится к запросам потребителей и тем самым способствует укреплению рыночных позиций организации.

Выдвинутая в начале настоящей работы гипотеза нашла эмпирическое подтверждение. Человеческий капитал более не считается второстепенным или трудноизмеримым фактором – в современных экономических условиях он представляет собой актив, поддающийся количественной оценке и оказывающий прямое влияние на балансовую и рыночную стоимость предприятия.

Обобщённые результаты, полученные из нескольких независимых источников, свидетельствуют об этом. Согласно данным аналитических отчётов:

возврат на вложенные в персонал средства достигает 176% [2];

по материалам Высшей школы экономики, среднегодовой прирост производительности в компаниях-лидерах составляет 21% [5];

отраслевые примеры, в частности из сферы недвижимости, демонстрируют рост удовлетворённости клиентов на 35% при внедрении карьерных маршрутов [1].

Совокупность этих фактов позволяет сделать следующий вывод: инвестиции в повышение квалификации сотрудников и автоматизацию кадровых процессов представляют собой не издержки, а один из наиболее эффективных способов расширения бизнеса.

Таким образом, целенаправленное улучшение качественных характеристик трудовых ресурсов – профессиональной квалификации, производительности труда, степени вовлечённости работников – закономерно преобразуется в рост финансовых показателей предприятия и укрепление его конкурентных позиций на целевом рынке. Указанный эффект достигается за счёт повышения операционной эффективности и последовательной ориентации деятельности компании на потребности клиента.

Список литературы

1. Анорова О. Как инвестиции в команду влияют на прибыль компании // РБК Компании. 01.11.2025. URL: https://companies.rbc.ru/news/lgK9c4zKin/kak-investitsii-v-komandu-vliyayut-na-pribyil-kompanii/ (дата обращения: 07.04.2026).

2. Dayforce Inc. Total Economic Impact Study Finds Organizations Achieved 176% ROI With Dayforce // Business Insider. 17.02.2026. URL: https://markets.businessinsider.com/news/stocks/total-economic-impact-study-finds-organizations-achieved-176-roi-with-dayforce-1035834666 (дата обращения: 07.04.2026).

3. Балчат, Б. Б. А. Оценка влияния социального капитала на развитие человеческих ресурсов в современных компаниях / Б. Б. А. Балчат, И. А. Морозова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 2, № 2(155). – С. 11–20.

4. Нажмитдинов, А. Ж. Роль человеческого капитала в управлении инновационным потенциалом компаний и индикаторы эффективности / А. Ж. Нажмитдинов, Д. Р. Таджиева // Лизинг. – 2026. – № 1. – С. 44–49.

5. ТАСС. Быстрорастущие компании обеспечили 73% прироста выручки российского бизнеса – исследование // Журнал Financial One. 28.10.2025. URL: https://fomag.ru/news-streem/bystrorastushchie-kompanii-obespechili-73-prirosta-vyruchki-rossiyskogo-biznesa-issledovanie/ (дата обращения: 07.04.2026).

Плахотникова Е.В.
д.т.н., профессор кафедры «Инструментальные и метрологические системы»
Тульский государственный университет
Россия, Тула
e_plahotnikova@mail.ru
Кондратова А.И.
аспирант
Тульский государственный университет
Россия, Тула
an.kondratova@mail.ru

КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РИСКОВ

Аннотация. В статье обоснована необходимость интеграции рискориентированного и клиентоориентированного подходов в систему управления промышленным предприятием. Показано, что традиционные методы оценки рисков преимущественно ориентированы на экономические последствия и недостаточно учитывают влияние неблагоприятных событий на удовлетворенность потребителя. Предложен комплексный подход к оценке риска, основанный на совместном рассмотрении тяжести экономических потерь и тяжести потерь удовлетворенности потребителя. Для количественной оценки последней использован квалиметрический подход с декомпозицией показателя удовлетворенности на частные критерии качества, времени и стоимости с последующим агрегированием на основе функции желательности Харрингтона и взвешенного усреднения. Разработанная модель позволяет выявлять общие причины возникновения неопределенности, повышать обоснованность профилактических мероприятий и сокращать неоправданные затраты на управление рисками. Практическая апробация подхода на промышленном предприятии показала его применимость для обоснования превентивных мер и повышения эффективности производственных процессов.

Ключевые слова: клиентоориентированный подход, риск, вероятность, тяжесть, удовлетворенность.

Plakhotnikova E V.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Instrumental and Metrological Systems
Tula State University
Russia, Tula
e_plahotnikova@mail.ru
Kondratova A.I.
Postgraduate Student
Tula State University
Russia, Tula
an.kondratova@mail.ru

CUSTOMER-ORIENTED APPROACH TO RISK ASSESSMENT

Abstract. This paper examines the integration of risk-based and customer-focused management principles in industrial enterprises. It highlights the limitations of conventional risk assessment methods, which tend to prioritize financial outcomes while overlooking the impact of adverse events on customer satisfaction. A combined risk evaluation framework is proposed. It incorporates both economic loss severity and the degree of customer dissatisfaction. Customer satisfaction is quantified using a qualimetric approach. The overall indicator is decomposed into key components, including quality, time, and cost. These components are then aggregated using Harrington's desirability function and a weighted averaging method. The proposed model helps identify underlying sources of uncertainty and supports more informed decision-making in preventive risk management. It also contributes to reducing inefficient resource allocation. The approach was tested in an industrial setting and demonstrated its usefulness in justifying preventive actions and improving operational performance.

Keywords: customer-oriented approach, risk, probability, severity, and satisfaction.

Усиление конкуренции и рост требований потребителей обусловливают необходимость интеграции рискориентированного и клиентоориентированного подходов в систему управления промышленным предприятием.

Существующие подходы к оценке рисков в большинстве ориентированы на анализ экономических последствий и в недостаточной степени учитывают влияние рисковых событий на удовлетворенность потребителя.

Анализ основных подходов и методов оценки рисков позволили установить, что экономические и репутационные риски рассматриваются как две отдельные категории. Ввиду искусственной дифференциации вышеуказанных рисков происходит излишнее тиражирование предупреждающих мероприятий по их снижению несмотря на то, что часть рисков может быть следствием общей неопределенности, возникающей в результате одной причины. Для обеспечения устойчивости и эффективности функционирования промышленного предприятия необходим новый комплексный клиентоориентированный подход к оценке рисков, учитывающий общие причины возникновения неопределенностей.

Развитие данного направления предполагает уточнение и углубление методических положений рискориентированного управления в контексте клиентоориентированного подхода, а также их адаптацию к задачам функционирования систем менеджмента качества промышленных предприятий. Это способствует расширению теоретической базы и повышению эффективности применения соответствующих инструментов в практике управления.

В общем случае риск – это вероятность наступления событий, способных оказать влияние на достижение поставленных целей [1].

Практика показывает, что неблагоприятные события, возникающие в деятельности предприятия, как правило, приводят к двум основным группам последствий: увеличению экономических потерь и снижению уровня

удовлетворенности потребителя. В связи с этим указанные последствия целесообразно рассматривать в качестве взаимосвязанных комплексных показателей.

Тяжесть риска может быть выражена совокупностью двух составляющих: тяжесть экономических потерь (ТЭ) и тяжесть потерь удовлетворенности потребителя (ТУ).

Это позволяет конкретизировать математическую модель для оценки риска:

$$R_i = Q_i \cdot f(\mathrm{T}_{\mathrm{Э}i}; \mathrm{T}_{\mathrm{У}i}) \quad (1)$$

где Qi – вероятности возникновения i-го неблагоприятного события,

$f(\mathrm{T}_{\mathrm{Э}i}; \mathrm{T}_{\mathrm{У}i})$ – комплексный показатель тяжести последствий данного i-го события с учетом возможного экономического ущерба и снижения удовлетворенности потребителя,

f – функция, связывающая между собой тяжести $\mathrm{T}_{\mathrm{Э}i}$ и $\mathrm{T}_{\mathrm{У}i}$.

При этом тяжесть экономических потерь ($\mathrm{T}_{\mathrm{Э}i}$) поддаётся прямой количественной оценке, тогда как тяжесть потерь удовлетворенности потребителя ($\mathrm{T}_{\mathrm{У}i}$) характеризуются более сложной, многокомпонентной природой, что затрудняет их непосредственную формализацию. В связи с этим целесообразно обратиться к квалиметрическому подходу, в рамках которого качество рассматривается как иерархически организованная система взаимосвязанных свойств, описываемых посредством единичных, комплексных и интегральных показателей, что создает методологическую основу для их количественной оценки [2]. С этой точки зрения $\mathrm{T}_{\mathrm{У}i}$ могут быть декомпозированы на совокупность частных показателей, поддающихся измерению и последующей интеграции.

К числу ключевых показателей, отражающих уровень удовлетворенности потребителей, относятся: качество продукции, сроки поставки и стоимость, формирующие базовую совокупность критериев восприятия результатов деятельности организации [3].

Для пояснения предлагаемого подхода рассмотрим графологическую модель тяжести последствий риска, представленную в виде древовидной диаграммы (рис. 1).

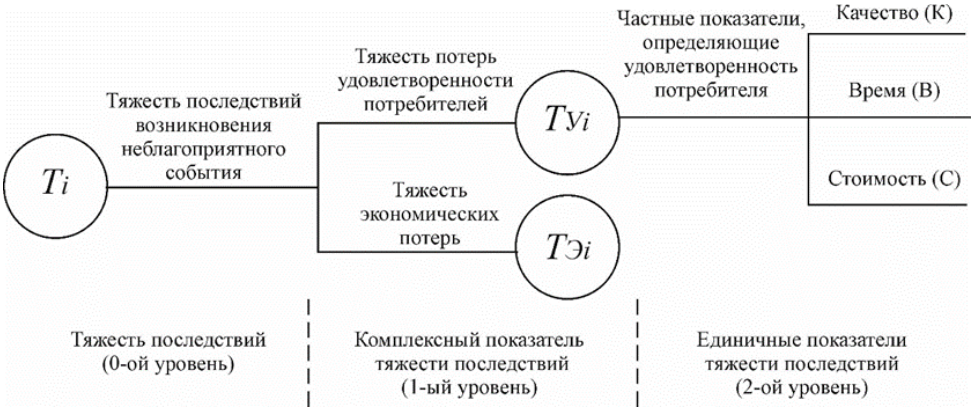


Рис. 1. Графологическая модель тяжести последствий риска

Тяжесть последствий возникновения неблагоприятного события (0-ой уровень) является комплексным показателем, который складывается из совокупности менее общих комплексных показателей (1-ый уровень), каждый из которых так же представляет совокупность более простых – единичных показателей (2-ой уровень).

Значения комплексных показателей тяжести риска (0-ой уровень), учитывающего совокупность возможных экономических потерь и потерь, снижающих удовлетворённости потребителя, целесообразно определять с применением методов взвешенного усреднения комплексных оценок [4].

Формула для расчета среднего взвешенного арифметического комплексного показателя тяжести последствий риска на 0-ом уровне имеет вид:

$$\mathrm{T}_i = \mathrm{T}_{\mathrm{Э}i} \cdot m_{\mathrm{Э}i} + \mathrm{T}_{\mathrm{У}i} \cdot m_{\mathrm{У}i}\,, \qquad (2)$$

где ТЭi – относительные значения тяжести риска с экономической точки зрения; ТУi – относительные значения тяжести риска с точки зрения потери удовлетворенности потребителя; mЭi – значение коэффициента весомости для тяжести экономических потерь; mУi – значение коэффициента весомости для тяжести потерь удовлетворенности потребителя.

Коэффициенты весомости (mЭi, mУi) определяют числовые значения значимости показателей ТЭi и ТУi. В зависимости от приоритетов предприятия и их целей возможны различные варианты соотношения коэффициентов весомости:

$m_{\mathrm{Э}i} = m_{\mathrm{У}i}$ – равнозначность последствий;

$m_{\mathrm{Э}i} > m_{\mathrm{У}i}$ – приоритет экономических последствий;

$m_{\mathrm{Э}i} < m_{\mathrm{У}i}$ – приоритет последствий, снижающих удовлетворенность потребителя.

Управление значениями коэффициентов mЭ и mУ обеспечивает адаптацию системы оценки рисков к стратегии предприятия и позволяет учитывать уровень его клиентоориентированности.

Комплексный показатель тяжести потерь удовлетворенности потребителя ТУi не поддается непосредственному количественному измерению, поэтому ее целесообразно определять косвенно через обобщенный показатель удовлетворенности DУi. При этом DУi соответствует максимальному уровню удовлетворенности потребителя, то есть отсутствию потерь по данному направлению. Следовательно, любое отклонение DУi от единицы отражает снижение удовлетворенности потребителя и, соответственно, тяжесть последствий неблагоприятного события. В связи с этим тяжесть потерь удовлетворенности потребителя может быть определена как:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{У}i} = 1 - D_{\mathrm{У}i}\,, \qquad (3)$$

где $D_{\mathrm{У}}$ – обобщенный показатель степени удовлетворенности потребителя.

Обобщенный показатель удовлетворенности потребителя может быть рассчитан на основе трёх частных критериев: качество (К), время (В) и стоимость (С):

$$D_{\text{У}} = {d_{\text{К}}}^{\beta_{\text{К}}} \cdot {d_{\text{В}}}^{\beta_{\text{В}}} \cdot {d_{\text{С}}}^{\beta_{\text{С}}} , \quad (4)$$

где dК – частный критерий удовлетворенности качеством (К), dВ – частный критерий удовлетворенности временем выполнения заказа (В), dС – частный критерий удовлетворенности стоимостью (С); βК, βВ, βС – коэффициенты весомости частных критериев К, В, С соответственно.

Для агрегирования частных критериев в формуле (4) их необходимо перевести в абсолютную интервальную шкалу [0; 1], на которой выполнимы все математические операции. Сделать это возможно используя функцию желательности Харрингтона [5].

Аналитическая функция в данном случае будет иметь вид:

$$d_i = \exp\left(-\exp\left(-y_i'\right)\right), \quad (5)$$

где di – значение i-го критерия по шкале желательности, y_i' – кодированное значение частного показателя (yi), то есть его значение в условном масштабе.

Значения коэффициентов весомости βК, βВ, βС могут быть определены методом ранжирования, при этом статистически значимое значение коэффициента конкордации Кендалла должно свидетельствовать о высокой степени согласованности экспертных оценок.

Для кодирования значений частных показателей (yi) можно использовать нормирование, линейное или нелинейное преобразование.

В качестве примера приведем результаты кодирования частного критерия К путем использования линейного преобразования, опуская промежуточные вычисления.

Для частного критерия качество (К) формула для кодирования имеет вид:

$$y_{\text{К}}' = \frac{y_{\text{К}max}^{\text{гр}} \cdot y_{\text{К}min}^{\text{гр}'} - y_{\text{К}max}^{\text{гр}'} \cdot y_{\text{К}min}^{\text{гр}}}{y_{\text{К}max}^{\text{гр}} - y_{\text{К}min}^{\text{гр}}} + \frac{y_{\text{К}max}^{\text{гр}'} - y_{\text{К}min}^{\text{гр}'}}{y_{\text{К}max}^{\text{гр}} - y_{\text{К}min}^{\text{гр}}} \cdot y_{\text{К}} , \quad (6)$$

где $y_{\text{К}max}^{\text{гр}}$ и $y_{\text{К}min}^{\text{гр}}$ - максимальное и минимальное граничные не кодированные значения критерия К, определяемые путем опроса потребителей; $y_{imax}^{\text{гр}'}$ и $y_{imin}^{\text{гр}'}$ - максимальное и минимальное граничные кодированные значения критерия К, определяемые производителем посредством задания приемлемых для него граничных значений функции желательности.

Для пояснения на графике (рис.2) указаны несколько условных точек, которые могут определять допустимые границы.

Задав граничные значения $d_{imax}^{\text{гр}}$ и $d_{imin}^{\text{гр}}$ функции Харрингтона, графически (см. рис. 2) или путем расчета (формула 5) можно определить максимальное $y_{imax}^{\text{гр}'}$ и минимальное $y_{imin}^{\text{гр}'}$ кодированные значения критериев y'i. Для определения не кодированных значений этих же показателей $y_{imax}^{\text{гр}}$ и $y_{imin}^{\text{гр}}$ необходимо сопоставить фактическое значения, например полученные путем опроса потребителей.

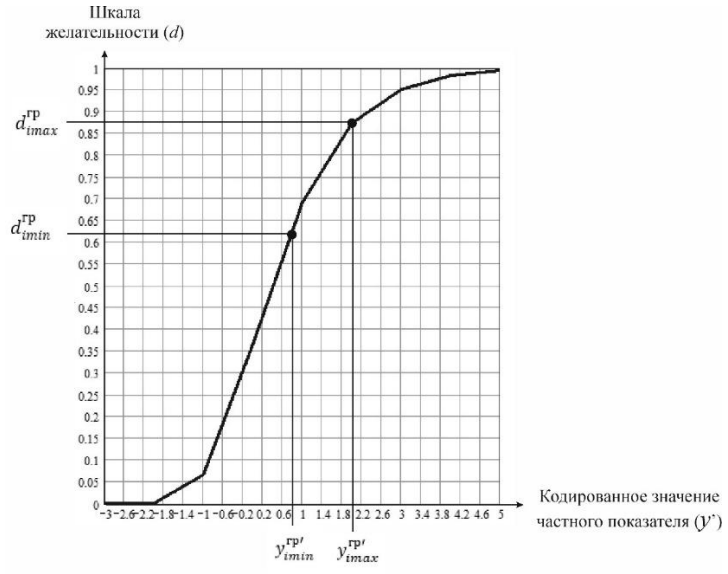


Рис. 2. Функция Харрингтона с условными точками допустимых границ

Предложенный подход к количественной оценки тяжести риска с точки зрения потери удовлетворенности потребителя позволяет перейти к комплексной оценке тяжести рисков (формула 2), а затем к количественной оценки рисков (формула 1) по общим причинам, используя полученные данные для анализа достаточности предупреждающих мероприятий, направленных на их снижение.

Применение клиентоориентированного подхода к оценке рисков на предприятии Тульской области ООО «Ди Ферро» позволило на этапе планирования новой линейки продукции провести оценку достаточности превентивных мероприятий для снижения рисков производственных процессов и обосновать необходимость внедрения в производственный процесс метода «точно в срок» (JIT) и вытягивающей системы (Kanban). По предварительной оценки экономический эффект от применения клиентоориентированного подхода к оценке рисков составит 400 тыс. руб.

Результаты

Предложенный клиентоориентированный подход к оценке рисков направлен на обнаружение возможных угроз, влияющих как на удовлетворенность потребителей, так и на экономическое благосостояние производителя в целом. Он может быть успешно применен для улучшения систем менеджмента качества на предприятиях независимо от сферы их деятельности.

Такой подход позволит сократить финансовые потери, связанные с устранением рисков за счет более эффективного распределения ресурсов и сокращения неоправданных расходов на мероприятия по управлению рисками, которые возникают по общим причинам.

Разработанные математические и графологические модели дают возможность более точно прогнозировать и планировать риски, с которыми может столкнуться предприятие.

Список литературы

1. Higgins, P. Understanding the New ISO and COSO Updates. Risk Management Magazine, 31 May 2018.
2. Будкин Ю.В., Газарян Н.В. Методика квалиметрической оценки эффективности деятельности Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2023. № 6 (75). С. 23–30.
3. ГОСТ Р 57522-2017. Бережливое производство. Руководство по интегрированной системе менеджмента качества и бережливого производства.: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2018-01-01/ Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2020. 16 с.
4. Шишкин И.Ф., Станякин В.М. Квалиметрия и управление качеством: Учеб. для Студентов вузов, обучающихся по спец. «Метрология, стандартизация и упр. качеством». – М.: Изд-во ВЗПИ, 1992. С. 254–255
5. Лапшова Л. В, Плахотникова Е.В. «Сравнение методик оценки качества технологических процессов изготовления деталей в машиностроении»//Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 10, с. 484–490.

Ковалева Е.А.
ведущий инженер
«СургутНИПИнефть» ПАО «Сургутнефтегаз»
Россия, Сургут
evgeniya.ligus@mail.ru
Парфеньева И.Е.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
iparfeneva@mail.ru

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ: ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Аннотация. В статье анализируется отечественный и зарубежный опыт в области контроля качества инженерных изысканий с целью повышения их достоверности и качества работ в этой области. Показаны отличительные особенности, преимущества и недостатки отечественного и зарубежного подходов к контролю качества инженерных изысканий.

Ключевые слова: система контроля качества, инженерные изыскания, регулирование качества инженерных изысканий.

Kovaleva E.A.
Senior Engineer
«SurgutNIPIneft» PJSC «Surgutneftegas»
Russia, Surgut
evgeniya.ligus@mail.ru
Parfenyeva I.E.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology, and Certification

Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
iparfeneva@mail.ru

QUALITY CONTROL OF ENGINEERING RESEARCH: DOMESTIC AND INTERNATIONAL EXPERIENCE

Abstract. The article analyzes domestic and foreign experience in the field of quality control of engineering research in order to increase their reliability and quality of work in this area. The distinctive features, advantages and disadvantages of domestic and foreign approaches to quality control of engineering research are shown.

Keywords: quality control system, engineering research, regulation of quality of engineering research.

Основополагающими нормативно-правовыми документами, регламентирующими строительство в России, являются Градостроительный кодекс Российской Федерации [1] и Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [2]. Эти документы совместно с целым рядом постановлений Правительства РФ и приказов министерств, курирующих строительную отрасль (Минстрой России, Минрегион России, Минприроды России и др.), формируют совокупность нормативно-технических документов, устанавливающих требования к производству всех видов работ в строительстве, в том числе к инженерным изысканиям.

Законодательством Российской Федерации определена ответственность лица, выполняющего инженерные изыскания, за полноту и качество инженерных изысканий и их соответствие требованиям технических регламентов. Результаты изысканий должны быть достоверными и достаточными для проектирования объекта строительства, а также разработки мероприятий по обеспечению его безопасности и надежности.

Помимо всего прочего исполнитель обязан обеспечивать внутренний контроль качества выполнения и приемку инженерных изысканий. Задача внутреннего контроля качества – проверка исполнителем соответствия выполняемых или выполненных полевых, лабораторных и камеральных работ требованиям задания, программы инженерных изысканий и нормативной документации.

Для обеспечения внутреннего контроля качества работ исполнитель обязан иметь систему контроля качества и приемки инженерных изысканий. Система контроля качества инженерных изысканий разрабатывается в виде стандарта организации или положения о системе контроля качества, и должна содержать требования к организации контроля и приемки работ, и соответствующие формы актов. Сам подход к организации контроля качества не установлен. Организация вправе разрабатывать собственную систему контроля, исходя из своей структуры, наличия ресурсов и возможностей.

Целью данной работы является анализ систем контроля качества инженерных изысканий в отечественной и зарубежной практике.

Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения достоверности результатов изысканий и минимизации рисков на этапах строительства и эксплуатации. Наличие ошибок из-за недостоверных и неточных результатов изысканий и невозможности их исправления неизбежно влекут за собой значительные убытки, срыв сроков строительства объектов.

В отечественной практике система контроля качества инженерных изысканий включает как правило входной, внутренний и внешний контроль.

Рассмотрим принятую в настоящее время систему контроля качества изысканий в саморегулируемой организации Союз «Роснефть-Изыскания».

В 2024 году организацией утвержден порядок контроля качества в виде стандарта СТО СРО-И-041-28122017 «О контроле качества выполняемых работ по инженерным изысканиям членами СРО Союз «РН-Изыскания. Общие положения» [3].

Согласно стандарту исполнителем должен проводится так называемый внутренний технический контроль. Ответственным за контроль выступает работник исполнителя, имеющий стаж не менее 5 лет в соответствующей области деятельности и не выполняющий непосредственно инженерные изыскания на контролируемом объекте. Из таких работников исполнитель формирует рабочую группу внутренних контролеров (экспертов).

Внутренний технический контроль включает входной контроль материалов и контроль в процессе выполнения изысканий. В таблице 1 приведена сводная информация о порядке проведения и формах отчетности контроля качества.

Таблица 1

Контроль качества результатов изысканий согласно стандарту СТО СРО-И-041-28122017

Вид контроля	Порядок проведения	Форма отчетности
1	*2*	*3*
Входной контроль материалов	Проводится для технического задания, программы изысканий и исходных данных, предоставляемых заказчиком, включая фондовые материалы, а также инженерные изыскания, выполненные ранее	Протокол контроля качества (форма разрабатывается предприятием самостоятельно), который включает: - наименование объекта согласно техническому заданию; - дату и номер протокола; - замечания к материалам или документам; - ФИО и должность специалистов, проводивших внутренний контроль. Копия письма заказчику, или протокол разногласий при наличии замечаний и предложений к техническому заданию и/или программе работ, представляемой заказчиком

Окончание табл. 1

1		*2*	*3*
Контроль в процессе выполнения изысканий	Контроль полевых работ	Контрольные измерения, сличения планов с местностью, проверка соответствия требований нормативной документации	Акт приемки полевых работ. Акт полевого контроля. Отметка в журнале горных выработок
	Контроль лабораторных работ	Осмотр проб, оценка правильности отбора проб, внутрилабораторный контроль качества	Отметки в соответствующих журналах
	Контроль камеральных работ	Проверка соответствия результатов требованиям нормативной документации и программы работ задания на выполнение изысканий	Подпись главного специалиста по направлению деятельности в информационно удостоверительном листе к техническому отчету инженерных изысканий
Контроль в процессе выполнения изысканий	Выходной контроль	Проверка: - соответствия выполненных работ программе проведения инженерных изысканий, - оформления документации, в том числе наличие подписей исполнителей и проверяющих лиц, - комплектности передаваемых результатов и сопроводительной документации, направляемых заказчику	Акт полевого контроля

Иной подход к контролю качества изысканий в Государственной компании Автодор. Инженерные изыскания для объектов строительства Автодора выполняются подрядными организациями [4]. Контроль качества выполненных работ проводится работниками ООО «Автодор-Инжиниринг» – дочерней организацией Автодора.

Контроль качества включает проверку работ на месте производства изыскательских работ и контроль лабораторных работ. Порядок контроля изысканий регламентирован инструктивными документами. В обоих случаях контроль выполняет работник ООО «Автодор-Инжиниринг» (эксперт, контролер).

В первом случае осуществляется визуальная и инструментальная проверка результатов изысканий, выполняется фото- и видеофиксация процесса, проверяется полевая документация (полевые дневники, журналы, бланки, ведомости, акты).

Во время контроля качества лабораторных работ проводится проверка соответствия условий окружающей среды в помещениях лаборатории, оценка условий хранения образцов, оснащенности лабораторным оборудованием и средствами измерений.

Оценка соответствия отчетных материалов заданию, программе изысканий, наличие любых отклонений по результатам контроля инженерных изысканий представляются в виде сводной информации.

В зарубежной практике также существуют разные подходы к контролю качества строительства, в том числе к инженерным изысканиям [5].

Например, в США к контролю качества допускаются инженеры, имеющие лицензию на проведение соответствующих проверок. Основа контроля – персональное лицензирование и ответственность.

Союз европейских стран (ЕС) стремится к единому подходу в нормативном регулировании в строительстве и контроле качества. В ЕС создана комплексная система стандартов – Eurocode. Особенности такой системы характеризуются:

- национальной адаптацией, включающей возможность для каждой страны вносить корректировки с учетом особенностей местности;
- внедрением требований в области экологии;
- сертификацией деятельности организаций и инженеров (специалистов) на добровольной основе в целях подтверждения компетентности исполнителей.

В тоже время отличительной чертой Японского регулирования является строгая система контроля качества в строительстве в виду высокой сейсмической активности. Поэтому система контроля включает:

- обязательную сертификацию на каждом этапе работ;
- изучение сейсмической активности;
- участие государственных органов в мониторинге качества выполненных работ;
- постоянное обновление нормативов с учетом новых технологий и научных данных.

Отдельно стоит упомянуть о Китае (КНР), так как его отличительной особенностью является взятие за основу моделей стандартизации бывшего Советского Союза [6]. Однако в настоящее время КНР внедряет систему оценки качества и сертификацию путем получения строительными компаниями сертификатов по системе управления качеством ISO 9001и системе управления окружающей средой ISO 14001. Ответственные за контроль качества в Китае – специализированные органы надзора и контроля качества (Государственное управление по контролю качества, инспекции и карантину (AQSIQ) и его региональные отделы).

Сравнительный анализ подходов к контролю качества и законодательного регулирования инженерных изысканий в ряде стран приведен в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ систем контроля качества и нормативных требований

Страна	Нормативно-правовое регулирование	Система контроля качества
Россия	Федеральные законы, стандарты	Экспертизапроектно-сметной документации
США	Законы штатов, кодексы строительства	Персональное лицензирование
Европейский союз	Национальные стандарты (Eurocode)	Сертификация всех видов работ
Япония	Национальные стандарты	Контроль госорганами
Китай	Национальные стандарты	Контроль специализированными органами надзора и контроля качества (AQSIQ)

Из всех вышеперечисленных зарубежных стран рассмотрим более детально организацию контроля качества работ одного из наиболее развитых мировых лидеров в этой области – США.

Строительство проектов в США регламентировано требованиями нормативных документов органов правительства различного уровня (федеральных штатных, графств, городов, местных органов власти [7, 8]. К таким документам относятся строительные кодексы. В отличие от российских стандартов типа ГОСТ или сводов правил, в кодексах отсутствуют общенациональные нормы. Основной целью создания строительных кодексов является защита здоровья и безопасности населения и окружающей среды. В них устанавливаются, в том числе, и требования к качеству. Кодексы являются рекомендованными по своему статусу, но только до возникновения события, связанного с аварией. В этом случае положения кодекса становятся обязательными, и действует презумпция виновности исполнителя.

Для контроля качества в строительной отрасли США применяют так называемый «Тотальный менеджмент качества» (Total Quality Management –TQM).

TQM это широко структуризированная система, цель которой вовлечение многочисленных исполнителей к совместной работе под руководством лица, ответственного за проект. Такая система создает восприятие проекта как своего личного дело. Каждый человек начинает искать пути улучшения, либо решения возникающих проблем, потому как они становятся ближе к самой проблеме.

Рабочие собрания по решению производственных задач проводятся в составе всех исполнителей, представителей бригад, супервайзеров. Собрания проводятся под руководством проект-менеджера. На еженедельных совещаниях до сведения участников доводятся установленные требования к качеству, к методам производства работ, также берутся во внимание мнения работников в части того, как можно улучшить запланированную работу, какие потребуются затраты ресурсов и времени. Все предложения учитываются супервайзером и проект-менеджером со всей серьезностью, обсуждаются и принимаются соответствующие решения. Также, до начала работ над проектом, составляется контрольный перечень качества проекта (Project Quality Checklist), где выявляются все требования стандарта качества, чтобы можно было подготовиться и проследовать за их соблюдением в процессе исполнения. Документ составляется путем обзора чертежей, извлекая из них требования, относящихся к качеству. В отечественной практике аналогом такого документа служит раздел программы инженерных изысканий, в котором перечислены виды работ контроля качества.

На протяжении всего периода строительства проект-менеджер проводит оценку вовлечения каждого участника, при этом отмечается количественный и качественный вклад. Контроль качества непосредственно на объекте выполняют привлеченные специалисты, инспекторы из независи-

мых фирм для контроля качества. Такой подход считается обычной практикой. Инспектор наблюдает за производством работ и сообщает о вышестоящему руководству о любых выявленных отклонениях для принятия мер.

Знание своего персонала помогает успешной работе по TQM и поэтому в США уделяется особое внимание к знанию своего персонала. Это помогает успешной работе по TQM. В этой связи можно выделить следующие принципы:

1) Работники должны быть вовлечены в дискуссии, анализ и выработку предложений и рекомендаций там, где они проявляют интерес.

2) На совещаниях необходимо упоминать выдающиеся идеи и достижения в работе, а также благодарить работников за хорошую выполненную работу.

3) Внедренное предложение должно поощряться денежным стимулом, наградой или нефинансовыми поощрениями, как, например, выделением мест для парковки машины и другими знаками внимания.

Анализ отечественного и зарубежного опыта контроля качества инженерных изысканий направлен на повышение достоверности и качества работ в этой области. Такой анализ позволяет:

- совершенствовать нормативную базу по инженерным изысканиям, например, стандартизировать технический контроль. Проведенный анализ отечественного опыта показал отсутствие единой системы обеспечения качества на всех этапах жизненного цикла объекта капитального строительства, начиная с исходных материалов, подходов к контролю качества и методов производства работ и заканчивая сдачей объекта в эксплуатацию;

- внедрять современные методы контроля качества в практику инженерных изысканий. Анализ зарубежного опыта контроля качества инженерных изысканий свидетельствует о важности и эффективности вовлечения каждого работника в строительные проекты;

- разрабатывать методики для оценки качества инженерных изысканий, например, оценку (аудит) выполненных изыскательской организацией работ и ее подрядчиками, направленную на выявление отклонений от первоначальных проектных решений.

Качественные инженерные изыскания – это основа надежности и экономической эффективности строительного проекта. Соблюдение технических требований и применение современных подходов к контролю качества обеспечивают получение достоверных данных для проектирования.

Список литературы

1. «Градостроительный кодекс Российской Федерации» от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 30.01.2026) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2026)

2. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/

3. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 N 384-ФЗ (последняя редакция)

4. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

5. СТО СРО-И-041-28122017 «О контроле качества выполняемых работ по инженерным изысканиям членами СРО Союз «РН-Изыскания. Общие положения».
6. file:///D:/Downloads/s40b4l50s1h2b6k05l0so2n837itgh2i%20(1).pdf
7. Могильный К.В., Козлов А.В. Контрольные мероприятия на этапе инженерных изысканий. // avtodor-eng.ru URL: https://avtodor-eng.ru/storage/app/media/news-posts/new/autumn%202023/%20Козлов%20Инженерные%20изыскания.pdf (дата обращения 07.04.2026).
8. Мировой опыт инженерных изысканий для России. URL: https://iziskania.com/blog/mirovoy-opyt-inzhenernyh-izyskaniy-dlya-rossii/(дата обращения 07.04.2026).
9. КНР: нормативное регулирование в строительстве URL: https://ss-center.tilda.ws/chinastandards(дата обращения 07.04.2026).
10. Л. Г. Дикман, Д. Л. Дикман. Организация строительства в США / Учебное издание М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004 г. – 376 с.
11. Л. Г. Дикман. Организация строительного производства. Издание пятое. / Учебник для строительных вузов / М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 608 стр.

Калинин Е.А.
начальник сектора
АО «ГосНИИП»
Россия, Москва
kalinineugene@inbox.ru

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ НА ЭТАПЕ ЖЦП «РАЗРАБОТКА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы контроля качества в рамках системы управления полным ЖЦП. Рассмотрена трансформация параметров качества изделия при переходе от одного этапа ЖЦП к другому. Рассмотрен этап ЖЦП «Разработка» и вероятность передачи опытного изделия в серийное производство при существующей схеме контроля. Предложен показатель для статистического контроля результатов опытного производства. Предложено применение статистических показателей, связанных с параметрами распределения, для оценки результатов опытного производства с целью выявления несоответствия действительных опытных образцов проектным нормам. Предложено применение системы нечеткого вывода для анализа качества КД и ТД по результатам производства и испытания опытных образцов.

Ключевые слова: СМК, приемочный контроль, ОКР, опытно-конструкторская работа, контроль опытных образцов, испытание опытных образцов, разработка, контроль на этапе разработки.

Kalinin E.A.
Head of sector
JSC «GosNIIP»
Russia, Moscow
kalinineugene@inbox.ru

PRODUCT QUALITY CONTROL AT THE STAGE OF PLM “DEVELOPMENT” USING A FUZZY INFERENCE SYSTEM

Abstract. This article examines quality control issues within a full life cycle management system. It examines the transformation of product quality parameters during the transition from one life cycle stage to another. The «Development» life cycle stage and the probability of transferring a prototype to serial production under the existing control scheme are considered. A metric for statistical control of pilot production results is proposed. The use of statistical metrics related to distribution parameters is proposed for evaluating pilot production results to identify discrepancies between actual prototypes and design standards. A fuzzy inference system is proposed for analyzing the quality of design documentation and technical documentation based on the production and testing of prototypes.

Keywords: TQM, acceptance control, R&D, experimental design work, control of prototypes, testing of prototypes, development, control at the development stage.

Интенсификация производства и применения продукции оборонно-промышленного комплекса (ОПК), рост требований к перспективным образцам, необходимость в оптимизации процессов разработки и испытаний с целью сокращения затрат и сроков работ демонстрирует необходимость всестороннего развития предприятий ОПК. Одной из основных составляющих предприятий является система контроля продукции, основы которой были заложены в советский период и опираются на опыт заложенный при создании ОПК тех лет. Современный период развития ОПК во многом связан с внедрением современных подходов к управлению качеством и созданием единой системы управления качеством и надежностью продукции (СУ КНП). Функционирование данной системы направлено на непрерывное улучшение качества и надежности продукции, организации бездефектного производства (нуль дефектов в эксплуатации).

Развитие СУ КНП на современном этапе связано с объединением информационно-аналитических методов и средств и классических и усовершенствованных методов статистики в высокотехнологических наукоемких автоматизированных производствах ОПК РФ, нацеленных на реализацию бездефектного производства [1].

Одним из ключевых факторов современного высокотехнологического наукоемкого производства является применение автоматизированных средств производства и контроля, обеспечивающих требуемую точность и повторяемость продукции, при значительном уменьшении влияния человеческого фактора. Применение в производстве сложной радиоэлектронной продукции (РЭП) автоматизированных средств контроля позволяет:

увеличить количество контролируемых в производстве параметров;

увеличить объем данных, собираемых при контроле (измерении) параметров;

обеспечить телеметрирование параметров изделий на различных этапах жизненного цикла продукции (ЖЦП);

обеспечить неизменность условий испытаний и измерений;

организовать автоматизированный сбор, хранение и учет результатов параметрического (измерительного) контроля;

создать единую базу данных проверок для последующей их оценки методами математической статистики.

Высокотехнологичная РЭП в особенности применяемая в области ОПК характеризуется требованиями по высокой эксплуатационной надежностью. Для обеспечения данных высоких показателей в РЭП встраиваются механизмы самоконтроля, позволяющие оценить собственную исправность с целью недопущения применения несоответствующего требованиям изделия. Контроль как правило предполагает оценку соответствия технических параметров изделия допустимым значениям, определяемыми при проектировании.

Контрольный допуск, как правило связан либо с требованиями к предельным отклонениям нормируемых в соответствии с требованиями технического задания или с собственными присущими РЭП значениями.

Эта предельных контрольных границ и действительных параметров изделия представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Взаимосвязь предельных контрольных границ и параметров изделия

Особенностью РЭП является их существенная зависимость от разброса характеристик применяемых электрорадиоизделий (ЭРИ). Тогда возможно провести статистический анализ партии изделий с целью определения параметров функции распределения характеристик изделия, на которую влияют:

– конструкция;

– корректность настройки (как технологического процесса, так и работы алгоритмов компенсации);

– стабильность параметров поставляемых комплектующих.

Эксплуатационная надежность, определяющая вероятность успешного прохождения самоконтроля может быть определена через вероятность нахождения случайной величины в пределах контрольных границ:

$$P(X_{min} < X < X_{max}) = 1 - P_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $P(X_{min} < X < X_{max})$ – вероятность соответствия параметров предельным границам контроля,

$P_{\text{доп}}$ – предельно допустимая вероятность отказа.

Результаты измерительного контроля позволяют сделать вывод, что РЭП могут иметь следующие отклонения от проектного представления:

функция распределения характеристики изделия не являющейся нормальной;

существенно отличающаяся относительно расчетной дисперсия $\sigma_{\text{доп}}$;

распределение параметра отличное от нормального;

ошибка центрирования параметра относительно номинала допускаю

С учетом этого действительная вероятность отказа при контроле параметра будет определяться как:

$$P\left(UC_{pk}L \le X \le LC_{pk}L \mid \mu = E, \sigma = \sigma_{\text{д}}\right) = 1 - P_{\text{доп}}, \quad \text{при } E = X_{\text{ном}} \text{ и } \sigma_{\text{д}} = \sigma_{\text{доп}}, \tag{2}$$

$$P_{\text{д}} = 1 - P\left(UC_{pk}L \le X \le LC_{pk}L \mid \mu = E, \sigma = \sigma_{\text{д}}\right), \tag{3}$$

$$E = \overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}, \tag{4}$$

$$LC_{pk}L = E - n_{\text{ЭРИ}} * \sigma_{\text{д}}, \tag{5}$$

$$UC_{pk}L = E + n_{\text{ЭРИ}} * \sigma_{\text{д}}, \tag{6}$$

$$\sigma_{\text{д}} = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}\right)^2}{n-1}}, \tag{7}$$

где $P_{\text{д}}$ – действительная вероятность получения брака в нормальном технологическом процессе, вариабельность которого вызвана общими причинами,

$UC_{pk}L$ – максимальное значение параметра прибора с учетом заданной дефектности;

$LC_{pk}L$ – минимальное значение параметра прибора с учетом заданной дефектности;

E – несмещенная оценка математического ожидания;

$\sigma_{\text{д}}$ – несмещенная оценка действительного среднеквадратичного отклонения параметра по S статистике;

n – объем выборки;

S^2 – несмещенная оценка дисперсии.

Для возможности обеспечения требуемой дефектности должны получить следующее соотношение:

$$UC_{pk}L \le UC_{\text{ном}}L \tag{8}$$

$$LC_{pk}L \geq LC_{\text{ном}}L \tag{9}$$

Примером идеального соответствия соотношения двухсторонних вероятностных границ является случай полного соответствия полученной конструкции модельному описанию, тогда будет обеспечиваться:

$$UC_{pk}L = UC_{\text{ном}}L \tag{10}$$

$$LC_{pk}L = LC_{\text{ном}}L \tag{11}$$

Данное соотношение исходя из заложенного принципа аналогично индексу пригодности процесса с учетом положения среднего (P_{pk})[5]:

$$P_{pk} = min\left(\frac{(X_{max} - E)}{3\sigma_{\text{д}}}, \frac{(E - X_{min})}{3\sigma_{\text{д}}}\right) \tag{12}$$

где P_{pk} – индекс пригодности процесса с учетом положения среднего.

Однако данный индекс, в отличие от предложенной двухсторонней вероятностной границы, имеет тот же ряд недостатков что и P_p.

При этом индекс пригодности с учетом положения среднего является частным случаем соотношения двух СКО при $n_{\text{ЭРИ}} = 3$:

$$\begin{aligned} P_{pk} &= min\left(\frac{(X_{max} - E)}{3\sigma_{\text{д}}}, \frac{(E - X_{min})}{3\sigma_{\text{д}}}\right) \\ &= min\left(\frac{UC_{\text{ном}}L - E}{UC_{pk}L - E}, \frac{E - LC_{\text{ном}}L}{E - LC_{pk}L}\right) \end{aligned} \tag{13}$$

Для исключения влияния указанных выше недостатков предложим показатель, позволяющий определить соотношение допуска и действительной дисперсии, но не основанный на применении квантиля нормального распределения, а, следовательно, лишенный указанных выше ограничений:

$$k_{pk} = \frac{P_{\text{доп}}}{P_{\text{д}}}, \tag{14}$$

где k_{pk} – коэффициент соотношения предельно-допустимой дефектности к действительно-ожидаемой.

Традиционный подход к контролю вероятности отказа складывается в проверке того, что вероятность отказа, рассчитанная на основе оценок меньше требуемой. Этот подход порождает проблему обеспечения эффективности контроля, поскольку при значительно меньшей относительно расчетной дисперсии даже значительные отклонения параметра от его нормального значения могут быть не зафиксированы.

Рассмотрим пример контроля такого параметра, результаты измерений, функция распределения контрольные вероятностные и предельные границы которого представлены на рисунке 2.

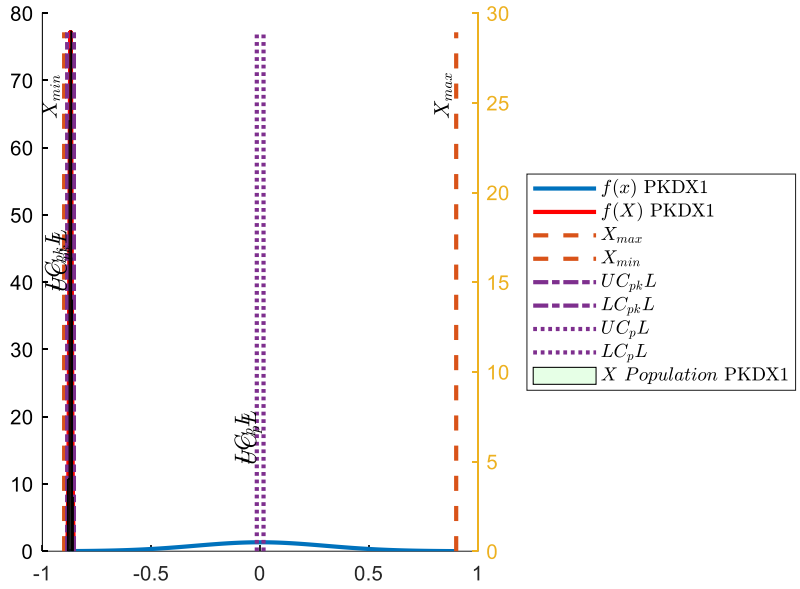


Рис. 2. Результаты измерений и статистического анализа параметра, участвующего в формировании готовности

На рисунке 2 явно видно, что распределение параметра имеет сильное смещение и все результаты измерений сосредоточенны у нижней границы допуска. При этом распределение параметра существенно меньше требуемого, а вероятность отказа достаточно мала, чтобы при испытании опытной партии данный дефект имел высокую (более 5%) вероятность не выявления избыточной вероятности отказа.

Исходя из функции распределения рассматриваемый параметр приводит к следующим недостаткам:

- вероятность ложного отказа в 30 раз превышает требуемую;
- превышение значения параметра более чем в 10 раз относительно действительного его предельного уровня не будет приводить к формированию отказа;

Рассмотренный пример показывает необходимость реализации системы оценки изделий, позволяющей выявлять несоответствие реального изделия его проектному представлению. Для выявления степени соответствия объекта на основе его характеристик некоему классу объектов можно применить методы нечеткой логики.

Структура системы нечеткого вывода представлена на рисунке 3.

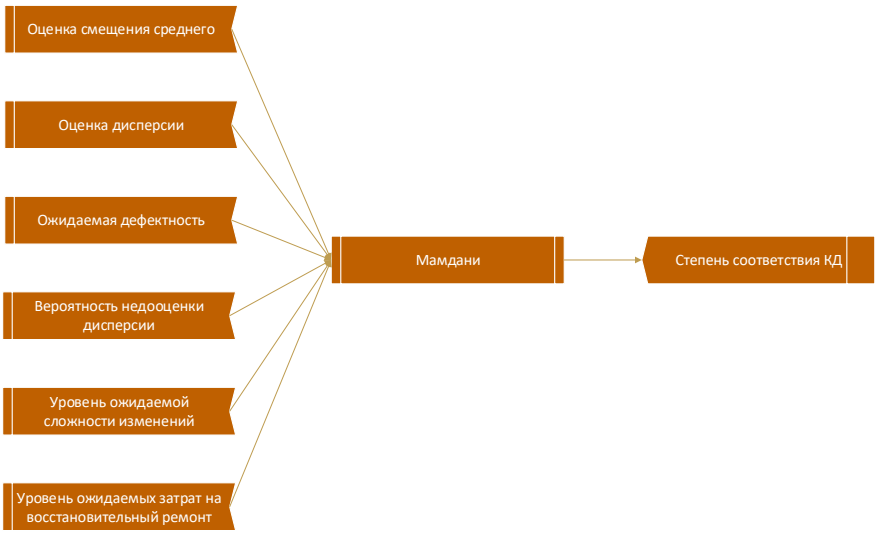


Рис. 3. Структура системы нечеткого вывода

Одним из базовых алгоритмов работы системы нечеткого вывода является алгоритм Мамдани, представленный на рисунке 4.

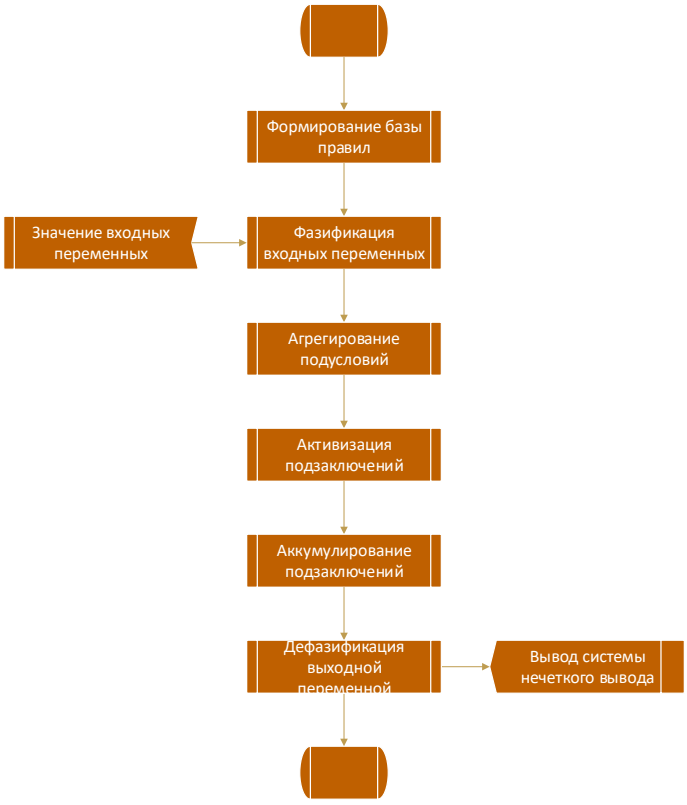


Рис. 4. Алгоритм Мамдани системы нечеткого вывода

Оценка изделия при помощи представленной системы позволяет выявить низкую степень соответствия реального изделия его проектному представлению через степень принадлежности опытной партии в среднем проектному представлению изделия.

Таким образом применив данную систему к ранее рассмотренным результатам измерения параметра, участвующего в формировании готовности, получим крайне низкую степень принадлежности опытной партии в среднем проектному представлению изделия по данному параметру. Выход системы позволяет при оценке качества изделия выявить наличие несоответствий и, при проведении дальнейшего анализа причин несоответствий, выявить наличие ошибок в конструкции/программном обеспечении.

Результаты измерения параметра, вероятностных и предельных границ с учетом корректировки допуска по результатам анализа представлены на рисунке 5. Значение степени принадлежности до корректировки и после представлено на рисунке 6.

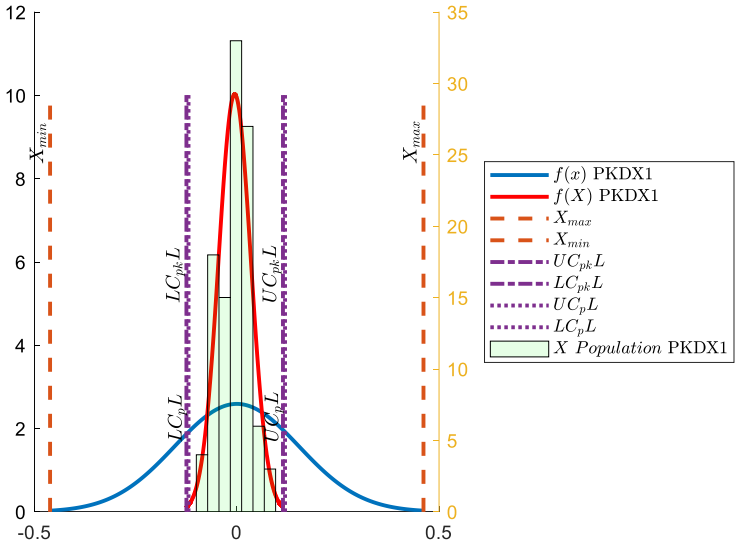


Рис. 5. Результаты измерений и статистического анализа параметра, участвующего в формировании готовности с учетом изменения границ контроля

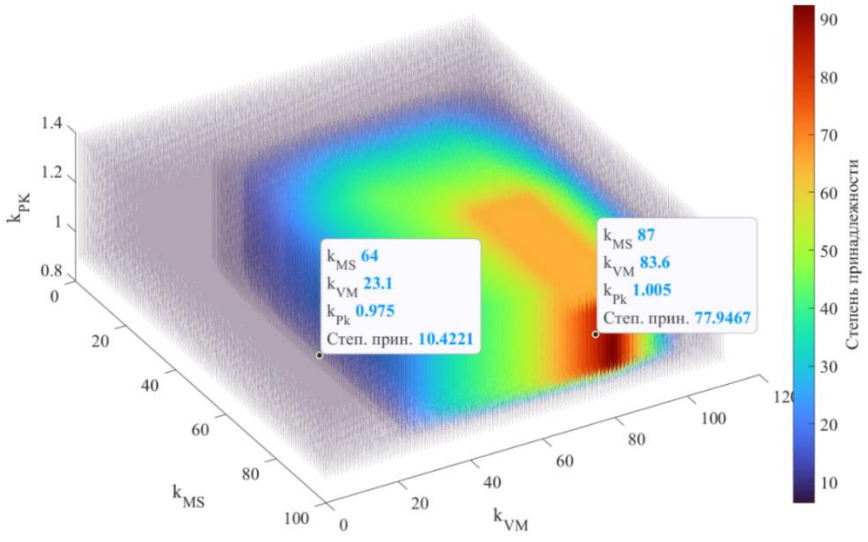


Рис. 6. Значение степени принадлежности до и после корректировки границ контроля

В результате корректировки смещения и предельных границ имеем:

- штатное формирование отказа при превышении значения параметра действительных предельных границ;

- более чем в 10000 раз меньшая вероятность ложного отказа относительно требований технического задания.

Практическая ценность применения системы нечеткого вывода при контроле качества проявляется путем выявления конструктивных дефектов, проявляющихся в повышенной вероятности дефектов в серийном производстве и низкой возможной эффективности контрольных мероприятий или не оптимальности конструкции.

Рассмотренные случаи показывают возможность применения системы нечеткого вывода для контроля качества и выявления конструктивных/программных дефектов на этапе ЖЦП «Разработка» с целью повышения качества изделий к моменту этапа ЖЦП «Производство».

Для контроля качества в рамках системы управления ЖЦП требуется выработка комплексных показателей качества, позволяющих проводить более полную оценку качества продукции на каждом из этапов ЖЦП. Контроль качества на этапе «Разработка» требует введения параметров оценивающих применимость КД и ТД на этапе «Производство». Для конечного контроля качества целесообразно применение системы нечеткого вывода, позволяющей оценить степень соответствия разработанной КД и ТД проектным нормам.

Список литературы

1. Остапенко С.Н. Управление качеством в вертикально интегрированных структурах ОПК: Интеграция систем менеджмента качества и АСУТП / С.Н. Остапенко, Г.В. Палихов, В.Б. Протасьев, С.В. Юдин // Вестник ВКО. – 2019. – № 2(22). – С. 99 – 109.
2. Особенности информационного обеспечения статистического контроля качества оборонной продукции однократного применинния при мелкосерийном производстве/ С. Н. Остапенко, В. М. Медведев, В. Б. Афанасьев и др. // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2022. – Спецвыпуск. С. 27 – 36.
3. Управление качеством в вертикально интегрированных структурах ОПК: Интеграция систем менеджмента качества и АСУТП / С.Н. Остапенко, Г.В. Палихов, В.Б. Протасьев, С.В. Юдин // Вестник ВКО. – 2019. – № 2(22). – С. 99 – 109.
4. Управления качеством и надёжностью оборонной продукции на основе статистического анализа результатов параметрического контроля / В. Б. Афанасьев, И. И. Бухов, В. М. Медведев, Е. А. Калинин // От качества инструментов к инструментам качества : Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Тула, 19–20 октября 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 204–209. – EDN IDRPBT.
5. ГОСТ Р 50779.44-2001. Статистические методы. Показатели возможности процессов. Основные методы расчета : нац. стандарт Российской Федерации : изд. офиц.. : принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 2 октября 2001 г. № 400-ст. : введен впервые / разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 125 «Статистические методы в управлении качеством продукции», Акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО НИЦ КД). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 15 с.

Затонский И.В.
аспирант
Московский авиационный институт
Россия, Москва
igorzatonskiy00@mail.ru
Ванчурин М.Д.
аспирант
Московский авиационный институт
Россия, Москва
mikhail.vanchurin@gmail.com

КОНТРОЛЬНЫЙ РАЗРЫВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫЕЗДНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения достоверности результатов выездных испытаний в деятельности испытательной лаборатории как задача системы управления качеством. Актуальность исследования обусловлена тем, что при проведении испытаний на территории заказчика существенно изменяются условия реализации процессов контроля по сравнению со стационарной лабораторной средой. В этих условиях возрастает влияние факторов, связанных с автономностью работы инженера-испытателя, изменчивостью внешней среды, ограниченной наблюдаемостью фактического хода испытаний, а также рисками внешнего воздействия со стороны заинтересованных лиц. Цель статьи заключается в выявлении и обосновании проблемы контрольного разрыва в системе управления качеством испытательной лаборатории при проведении выездных испытаний. Методологическую основу исследования составили процессный и рискориентированный подходы, положения стандартов в области управления качеством, компетентности испытательных лабораторий, аудита и управления рисками, а также методы нормативного, сравнительного и структурного анализа. В результате установлено, что традиционные механизмы контроля, основанные на проверке протоколов, рабочих записей, внутренних регламентов, обучении персонала и внутреннем аудите, обеспечивают преимущественно документальное подтверждение результатов, но не позволяют в полной мере наблюдать и верифицировать фактическое выполнение испытательных процедур в момент их осуществления. Это формирует контрольный разрыв, понимаемый как расхождение между требуемым уровнем управляемости и подтверждаемости процесса испытаний и реальными возможностями лаборатории по наблюдению и проверке действий специалиста при выездной работе. Показано, что наличие такого разрыва снижает результативность управления качеством и требует развития инструментов процессного контроля. Практическая значимость статьи состоит в возможности использования полученных выводов при совершенствовании систем управления качеством испытательных лабораторий, выполняющих выездные испытания.

Ключевые слова: испытательная лаборатория, управление качеством, выездные испытания, достоверность результатов, беспристрастность, рискориентированный подход, процессный контроль, контрольный разрыв.

Zatonskiy I.V.
Postgraduate Student
Moscow Aviation Institute
Russia, Moscow
igorzatonskiy00@mail.ru

Vanchurin M.D.
Postgraduate Student
Moscow Aviation Institute
Russia, Moscow
mikhail.vanchurin@gmail.com

CONTROL BREAK IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF THE TESTING LABORATORY DURING ON-SITE TESTS

Abstract. The article discusses the problem of ensuring the reliability of field test results in the activities of a testing laboratory as a task of the quality management system. The relevance of the study is due to the fact that the conditions for implementing control processes in the field differ significantly from those in a stationary laboratory environment. In these conditions, the influence of factors related to the autonomy of the testing engineer's work, the variability of the external environment, the limited observability of the actual testing process, and the risks of external interference from stakeholders increases. The purpose of the article is to identify and justify the problem of control gaps in the quality management system of a testing laboratory during field tests. The research methodology was based on process and risk-oriented approaches, as well as the provisions of quality management standards, the competence of testing laboratories, and auditing.

Keywords: testing laboratory, quality management, on-site testing, reliability of results, impartiality, risk-based approach, process control, and control gap.

Испытательные лаборатории занимают ключевое место в системе оценки соответствия продукции требованиям технических регламентов, национальных и международных стандартов. Результаты испытаний используются при подтверждении соответствия продукции установленным требованиям, проведении сертификации, контроле безопасности, оценке эксплуатационных характеристик и принятии последующих управленческих решений. По этой причине достоверность результатов испытаний выступает не частным техническим параметром, а одной из базовых характеристик качества функционирования лаборатории в целом [1, 2, 3].

В современной практике управление качеством деятельности испытательной лаборатории строится на сочетании требований к компетентности персонала, состоянию оборудования, применяемым методикам, документированию процессов, управлению рисками и внутреннему аудиту. Такой подход закреплен как в международных и национальных стандартах в области систем менеджмента качества, так и в нормативных актах, регулирующих деятельность испытательных лабораторий [4]. Вместе с тем достоверность результатов испытаний определяется не только соблюдением формальных требований к ресурсам и документам, но и фактическим качеством исполнения испытательных процедур.

В наибольшей степени данное обстоятельство проявляется при проведении выездных испытаний. Если стационарные испытания выполняются в контролируемой лабораторной среде, где руководство и сотрудники могут в большей мере наблюдать ход работ, то выездные испытания осуществля-

ются на территории заказчика, в условиях иной организационной, технологической и иногда даже психологической среды. В этих условиях инженер-испытатель действует существенно более автономно, а сама лаборатория получает ограниченные возможности прямого наблюдения за процессом выполнения работ. В результате возникает противоречие между высоким уровнем требований к управлению качеством и ограниченной наблюдаемостью фактического хода испытаний.

Практика показывает, что действующие механизмы системы управления качеством в испытательной лаборатории в значительной степени ориентированы на регламентацию правильного порядка действий и на последующий анализ уже оформленных результатов. Протоколы испытаний, рабочие записи, регистрационные формы, внутренние регламенты, планы внутренних аудитов, результаты обучения и подтверждения компетентности персонала представляют собой важные элементы управления качеством. Однако данные инструменты, будучи необходимыми, далеко не всегда позволяют однозначно установить, каким образом конкретно были выполнены испытательные процедуры, соблюдалась ли последовательность операций, не были ли пропущены отдельные этапы, соответствовали ли условия испытаний установленной методике, а также отсутствовало ли внешнее влияние на специалиста.

Именно это обстоятельство позволяет поставить вопрос о существовании в системе управления качеством испытательной лаборатории особой проблемы, которая наиболее отчетливо проявляется в условиях выездных испытаний и заключается в расхождении между формально подтверждаемым результатом и реально наблюдаемым процессом его получения. Для описания данной ситуации в статье используется понятие контрольного разрыва.

Целью статьи является выявление и обоснование проблемы контрольного разрыва в системе управления качеством испытательной лаборатории при проведении выездных испытаний.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: проанализировать роль системы управления качеством в обеспечении достоверности результатов испытаний; выявить особенности выездных испытаний как объекта управления качеством; систематизировать риски, возникающие при проведении выездных испытаний; оценить ограничения существующих методов контроля; обосновать понятие контрольного разрыва как специфической проблемы системы управления качеством.

Методологическую основу исследования составили положения процессного и рискориентированного подходов в управлении качеством, а также требования нормативных документов, регулирующих деятельность испытательных лабораторий и функционирование систем менеджмента качества. В качестве исходных нормативных оснований использованы положения ГОСТ ISO/IEC 17025–2019, ГОСТ Р ИСО 9001–2015, ГОСТ Р ИСО 19011–2021, ГОСТ Р ИСО 31000–2019, ГОСТ ISO/IEC 17043–2013, ГОСТ Р

50779.60–2017, ГОСТ 16504–81, а также законодательные акты, связанные с обеспечением единства измерений, техническим регулированием и аккредитацией [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Процессный подход использовался для рассмотрения выездных испытаний как самостоятельного объекта управления качеством, имеющего собственную структуру этапов, ресурсов, участников, входов, выходов и контрольных точек. Такой подход позволяет анализировать не только конечный результат испытаний, но и последовательность операций, обеспечивающих получение этого результата. Именно в контексте процессного подхода становится принципиально важным вопрос о наблюдаемости и подтверждаемости фактического хода испытаний, а не только о правильности оформления итоговой документации [8].

Рискориентированный подход применялся для выявления уязвимых участков выездных испытаний и систематизации факторов, потенциально влияющих на достоверность результатов. При этом под риском в рамках данной статьи понимается вероятность возникновения обстоятельств или действий, способных привести к отклонению от требований методики, снижению объективности испытаний, ошибкам в фиксации результатов либо к недостаточной доказуемости факта корректного выполнения работ. Использование рискориентированного подхода обусловлено тем, что в современных системах управления качеством предотвращение несоответствий рассматривается как не менее важная задача, чем их последующее выявление.

В ходе исследования применялись методы нормативного анализа, сравнительного анализа, структурирования и классификации. Нормативный анализ использовался для сопоставления требований стандартов и правил функционирования испытательных лабораторий с фактическими особенностями выездных испытаний. Сравнительный анализ позволил выявить различия между стационарной и выездной формами испытательной деятельности с точки зрения управляемости, наблюдаемости и подтверждаемости процессов. Метод классификации применялся для систематизации рисков выездных испытаний. Структурный анализ использовался для оценки ограничений существующих методов контроля и последующего обоснования понятия контрольного разрыва.

Отдельное методологическое значение имеет разграничение между нормативным требованием и механизмом его реализации. Нормативные документы устанавливают, что испытательная лаборатория должна обеспечивать достоверность результатов, беспристрастность, управление рисками, внутренний аудит и прослеживаемость измерений [9]. Однако сами по себе эти требования не определяют автоматически, какими именно практическими средствами лаборатория будет подтверждать фактическое соблюдение методики в условиях выездной работы. В этом состоит ключевой аналитический переход настоящего исследования: от констатации нормативных обязанностей – к анализу реальных возможностей лаборатории по процессному контролю выездных испытаний.

Таким образом, методология статьи ориентирована не на разработку прикладного технического решения, а на постановку и научное обоснование проблемы в контуре управления качеством. Это позволяет рассматривать контрольный разрыв как самостоятельный объект анализа и как важную характеристику зрелости системы управления качеством испытательной лаборатории.

Выездные испытания в системе управления качеством испытательной лаборатории следует рассматривать как особый процесс, отличающийся от стационарных испытаний не только местом проведения, но и характером управляемости. В условиях стационарной лаборатории процессы испытаний протекают в организационно и технически контролируемой среде. Лаборатория управляет оборудованием, параметрами среды, маршрутом документации, распределением ролей между сотрудниками и доступом к объекту испытаний. В условиях выездной работы значительная часть этих параметров становится переменной. Испытания проводятся на территории заказчика, в иной организационной среде, при наличии внешних лиц, не входящих в структуру лаборатории, а инженер-испытатель фактически реализует часть функций системы управления качеством автономно. Это означает, что выездные испытания являются не просто разновидностью испытательной деятельности, а отдельным объектом управления качеством, требующим специальных механизмов процессного контроля.

С позиций процессного подхода выездные испытания включают по меньшей мере несколько критически значимых этапов: подготовку к выезду, прибытие на объект, идентификацию объекта испытаний, проверку условий проведения работ, подготовку оборудования, выполнение испытательных операций, регистрацию промежуточных и итоговых результатов, оформление документации и передачу материалов в лабораторию. Каждый из этих этапов формирует самостоятельную зону риска. При этом специфика выездных испытаний состоит в том, что значительная часть указанных этапов не наблюдается лабораторией непосредственно, а реконструируется впоследствии по итоговым документам и сообщениям исполнителя. Вследствие этого лаборатория получает ограниченную возможность сопоставить регламентируемую модель процесса с его реальным исполнением [10].

Важной особенностью выездных испытаний является высокая зависимость их качества от организационного контекста. Если в лаборатории порядок действий, доступ к оборудованию, последовательность операций и режим фиксации результатов заранее встроены в устойчивую инфраструктуру, то на территории заказчика инженер-испытатель вынужден адаптироваться к фактическим условиям. Это может выражаться в ограниченном пространстве, дефиците времени, присутствии представителей заказчика в непосредственной близости к месту испытаний, особенностях размещения объекта, ограничениях по перемещению, нестандартных условиях подклю-

чения оборудования и иных факторах. Следовательно, требования к управлению качеством выездных испытаний должны учитывать не только правильность формальных процедур, но и изменчивость среды их реализации.

Рискориентированный анализ показывает, что выездные испытания характеризуются совокупностью взаимосвязанных рисков, которые целесообразно группировать по четырем основным направлениям: риски беспристрастности, процессные риски, технические риски и документальные риски. Данная классификация отражает не только разные источники потенциальных отклонений, но и разные формы их влияния на итоговую достоверность результатов испытаний. При этом каждая группа рисков способна проявляться как самостоятельно, так и в сочетании с другими, что усиливает уязвимость системы управления качеством.

Таблица

Матрица рисков выездных испытаний в системе управления качеством испытательной лаборатории

Группа риска	Основная форма проявления	Этап возникновения	Возможные последствия	Ограничения существующего контроля
Риски беспристрастности	Внешнее влияние на инженера-испытателя, давление со стороны заказчика, неформальное вмешательство в ход испытаний	Проведение испытаний на объекте заказчика	Снижение объективности действий, искажение хода испытаний, снижение доверия к результатам	Наличие деклараций и регламентов не позволяет подтвердить отсутствие фактического давления в момент испытаний
Процессные риски	Нарушение последовательности операций, пропуск этапов, частичное выполнение методики	Подготовка и проведение испытаний	Получение результата без полного соблюдения процедуры, скрытые отклонения от методики	Протокол и рабочие записи фиксируют результат, но не всегда позволяют восстановить реальный ход процесса
Технические риски	Ошибки настройки оборудования, влияние внешней среды, несоответствие условий требованиям методики	Подготовка оборудования и выполнение измерений	Снижение точности измерений, искажение результатов, невозможность корректного сравнения данных	Документы подтверждают наличие оборудования и записей, но ограниченно отражают фактические условия его применения
Документальные риски	Неполная, неточная или формально корректная, но недостаточно доказательная фиксация процесса и результатов	Регистрация и оформление итоговых материалов	Снижение прослеживаемости, сложности внутреннего аудита, ослабление доказательной базы лаборатории	Проверка оформления не обеспечивает полной верификации того, как фактически были выполнены испытания

Риски беспристрастности связаны с возможностью воздействия на инженера-испытателя со стороны заказчика или иных заинтересованных лиц. В отличие от стационарной лаборатории, где организационные границы и распределение ролей более жестко заданы, на объекте заказчика специалист

может сталкиваться с попытками ускорить процедуры, упростить отдельные этапы, изменить последовательность операций или интерпретацию результатов. Даже если прямое давление отсутствует, сам факт нахождения испытателя в среде заказчика создает ситуацию потенциального конфликта интересов. Для системы управления качеством это означает, что обеспечение беспристрастности должно оцениваться не только как декларативное требование, но и как параметр процессной устойчивости выездных испытаний [5].

Процессные риски касаются непосредственно выполнения методики испытаний. Они включают возможность сокращения объема предусмотренных операций, пропуска отдельных этапов, изменения последовательности действий, частичного выполнения обязательных процедур, недостаточной фиксации промежуточных результатов. Наиболее существенной особенностью данной группы рисков является то, что они могут не находить прямого отражения в итоговой документации. Протокол испытаний может быть оформлен корректно с формальной точки зрения, тогда как фактический процесс выполнения работ содержал отклонения, которые не были зафиксированы либо не могут быть достоверно восстановлены постфактум. Именно процессные риски наиболее тесно связаны с проблемой наблюдаемости и подтверждаемости хода выездных испытаний.

Технические риски связаны с использованием оборудования и условиями проведения испытаний. К ним относятся ошибки подготовки оборудования, отклонения в настройке средств измерений, влияние внешней среды, несоответствие фактических условий требованиям методики, ограничения по размещению приборов и объекта испытаний. В лабораторной инфраструктуре подобные риски в значительной степени компенсируются стандартизированной средой и регулярным внутренним контролем. При выездной работе вероятность подобных отклонений возрастает, а возможности их своевременного выявления со стороны лаборатории снижаются. Это усиливает зависимость достоверности результатов не только от формального соответствия оборудования требованиям, но и от корректности его фактического применения на объекте заказчика [3].

Документальные риски проявляются в неполноте, неточности или искажении информации в рабочих записях, регистрационных формах и протоколах испытаний. Однако в контексте выездных испытаний они имеют более глубокую природу, чем простые ошибки оформления. Документальный риск возникает также тогда, когда итоговая запись не позволяет верифицировать фактический ход испытаний, то есть правильно оформленный документ не обладает достаточной доказательной силой в части подтверждения того, как именно выполнялись испытательные процедуры. Таким образом, документальные риски в выездных испытаниях необходимо рассматривать как часть более широкой проблемы доказуемости процесса.

Система управления качеством испытательной лаборатории располагает развитым набором инструментов контроля: внутренними регламентами, процедурами, документированием полномочий, обучением и подтверждением компетентности персонала, оценкой рисков, внутренними аудитами, анализом со стороны руководства, проверкой записей и протоколов. Все эти механизмы необходимы и функционально оправданы. Они обеспечивают нормативную определенность деятельности, воспроизводимость процедур, единообразие документации и системность корректирующих действий. Однако сравнительный анализ показывает, что большая часть указанных средств ориентирована либо на предварительное установление правил, либо на последующую проверку документально оформленного результата. Иными словами, система в значительной степени контролирует предписание процесса и его отражение, но в существенно меньшей степени – сам процесс в момент его осуществления.

Именно это обстоятельство позволяет говорить о формировании контрольного разрыва. Под контрольным разрывом в системе управления качеством испытательной лаборатории при проведении выездных испытаний предлагается понимать расхождение между требуемым уровнем управляемости и подтверждаемости процесса испытаний и фактическими возможностями лаборатории по наблюдению и верификации действий инженера-испытателя в момент выполнения испытательных процедур. Данное определение подчеркивает, что проблема заключается не в отсутствии контроля вообще, а в структурной неполноте существующего контроля применительно к специфике выездной деятельности.

Контрольный разрыв проявляется прежде всего в трех взаимосвязанных аспектах. Во-первых, возникает разрыв наблюдаемости: лаборатория не обладает достаточными средствами для непосредственного восприятия ключевых этапов фактического процесса. Во-вторых, возникает разрыв подтверждаемости: по итоговой документации невозможно в полной мере доказательно установить, как именно выполнялись отдельные действия. В-третьих, возникает разрыв управляемости: наличие регламентов и требований не всегда означает возможность оперативно обнаружить отклонение в момент его возникновения. В совокупности это приводит к тому, что система управления качеством сохраняет формальную полноту, но не достигает полной процессной прозрачности выездных испытаний.

Следствием контрольного разрыва становится снижение доказательной устойчивости системы управления качеством. Внутренний аудит в значительной степени вынужден опираться на документы и объяснения исполнителей, а не на объективно наблюдаемые данные о ходе испытаний. Управление рисками становится более вероятностным и менее верифицируемым. Обеспечение беспристрастности сохраняет преимущественно нормативно-декларативный характер, так как наличие обязательств само по себе еще не гарантирует возможности проверки их соблюдения в реальной выездной ситуации. Прослеживаемость испытаний также оказывается ограниченной,

поскольку лаборатория фиксирует главным образом результаты и их документальные следы, но не весь фактический маршрут их получения.

Важно подчеркнуть, что наличие контрольного разрыва не означает автоматически недостоверности всех результатов выездных испытаний. Речь идет о снижении способности системы управления качеством гарантированно и доказательно подтверждать корректность их получения во всех случаях. Именно поэтому контрольный разрыв следует рассматривать как характеристику уязвимости системы, а не как констатацию системного дефекта ее результатов. Такая постановка вопроса имеет принципиальное значение, поскольку переводит обсуждение из плоскости обвинительного анализа в плоскость совершенствования архитектуры контроля.

С практической точки зрения выявление контрольного разрыва позволяет сформулировать требования к дальнейшему развитию управления качеством выездных испытаний. Во-первых, система контроля должна обеспечивать более высокий уровень наблюдаемости критически значимых этапов процесса. Во-вторых, она должна повышать подтверждаемость ключевых действий инженера-испытателя без разрушения действующей нормативной модели СМК. В-третьих, новые средства контроля должны быть интегрированы в процедуры внутреннего аудита, анализа рисков и корректирующих действий. В-четвертых, они должны усиливать защиту беспристрастности и достоверности результатов, не подменяя собой существующие требования к компетентности, оборудованию и документации.

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что выездные испытания образуют в системе управления качеством испытательной лаборатории самостоятельную проблемную область, в которой традиционные механизмы документального и процедурного контроля оказываются недостаточными для полной процессной верификации. Это обосновывает необходимость рассматривать контрольный разрыв как самостоятельную научно-практическую проблему управления качеством и как отправную точку для дальнейшего развития инструментов процессного контроля выездных испытаний.

Список литературы

1. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Москва: Стандартинформ, 2021. 32 с.

2. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [Электронный ресурс] Электронная справочно-правовая система «Консультант Плюс». – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/

3. Управление качеством деятельности метрологических лабораторий на основе комплексной цифровой трансформации / И.В. Затонский, М.Д. Ванчурин, В.А. Васильев [и др.]. Известия ТулГУ. Технические науки. 2025. №10. С. 285–293.

4. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 31с.

5. ГОСТ Р ИСО 19011–2021. Оценка соответствия. Руководящие указания по аудиту систем менеджмента. – М.: Стандартинформ, 2019. – 36с.

6. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13с.
7. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 24с.
8. Васильев В. А., Александрова С. В. Управление качеством на основе цифровых технологий // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2022. №. 9. С. 18–25. DOI: https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-9-18-25.
9. Васильев В. А., Александрова С. В. Управление качеством наукоемких процессов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2024. №. 9. С. 33–41. DOI: https://doi.org/10.30987/2223-4608-2024-33-41.
10. Васильев, В. А., Одиноков, С. А. Методология управления и улучшения качества инновационных технологических процессов. М., 2016. 160 с.

Саного Мохамаду
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
mahamadousanogo@mail.ru
Вячеславова О.Ф.
д.т.н., профессор кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vyache-smis@mail.ru

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СМЕШЕНИЯ ПОНЯТИЙ «МАРКЕТИНГ» И «РЕКЛАМА» НА КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННОСТЬ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ МАЛИ

Аннотация. во многих малых и средних предприятиях (МСП) Мали маркетинг часто сводится к рекламной деятельности или простой коммерческой коммуникации. Такая ограничительная интерпретация приводит к чрезмерному акценту на немедленных продажах в ущерб анализу потребностей рынка, удовлетворенности и долгосрочной лояльности клиентов. На основе систематического обзора академической и институциональной литературы, проведенного в данном исследовании, а также контекстного анализа управленческой практики, выявлены механизмы, объясняющие природу такого смешения понятий, исследуется его влияние на клиентоориентированность и устойчивую эффективность бизнеса. Исследование завершается рекомендациями, направленными на смену акцентов и перепозиционирование маркетинга как стратегической функции создания ценности, адаптированной к социально-экономическим реалиям малийских малых и средних предприятий (МСП).

Ключевые слова: маркетинг, реклама, ориентация на клиента, МСП, устойчивое развитие.

Sanogo Mahamadou
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University

Russia, Moscow
mahamadousanogo@mail.ru
Vyacheslavova O.F.
Doctor of Engineering, Professor of the Department
of Standardization, Metrology, and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vyache-smis@mail.ru

CONCEPTUAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF MIXING THE CONCEPTS OF "MARKETING" AND "ADVERTISING" ON CUSTOMER ORIENTATION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES IN THE REPUBLIC OF MALI

Abstract. In many small and medium-sized enterprises (SMEs) in Mali, marketing is often reduced to advertising or simple commercial communications. This restrictive interpretation leads to an excessive emphasis on immediate sales at the expense of market needs analysis, customer satisfaction, and long-term loyalty. Based on a systematic review of academic and institutional literature conducted in this study, along with a contextual analysis of management practices, we identify the mechanisms that explain this conceptual confusion and examine its impact on customer focus and sustainable business performance. The study concludes with recommendations aimed at shifting the focus and repositioning marketing as a strategic value-creation function adapted to the socioeconomic realities of Malian small and medium enterprises (SMEs).

Keywords: marketing, advertising, customer focus, SMEs, sustainable development.

Маркетинг выступает фундаментом организационной стратегии, поскольку он выстраивает взаимодействие компании с рынком и потребителями. Он не сводится лишь к продвижению товаров или услуг, а охватывает диагностику потребностей, адаптацию предложения, ценообразование, дистрибуцию и долгосрочное партнёрство с клиентами [1]. Клиентоориентированность – способность фирмы синхронизировать свои решения с текущими и будущими запросами покупателей – является ключевым фактором устойчивой результативности [2].

Однако в развивающихся странах, в частности в Мали, маркетинг остаётся слабо институционализированным и часто подменяется рекламой. Предприниматели преимущественно вкладывают средства в заметные, быстрые инструменты: таргетированную рекламу в Facebook и WhatsApp (популярных в Бамако), аудиосообщения на радиостанциях (Radio Kayira, Renouveau FM), билборды в торговых зонах, – но при этом не опираются на системный рыночный анализ или продуманную маркетинговую стратегию [3, 4].

Такая «перекошенность» в сторону немедленного продвижения сужает понимание рынка, подрывает способность предвидеть изменения потребительских предпочтений и создавать устойчивые конкурентные преимущества [5].

Цель статьи – концептуально исследовать, в какой мере смешение рекламы и маркетинга тормозит клиентоориентированность и долгосрочную

эффективность малийских МСП, контекстуально проанализировать эту проблему, выявить причины ее возникновения (в том числе социокультурные) и оценить их последствия для устойчивости бизнеса.

Исследование базируется на концептуально-аналитическом подходе, принятом в теоретических работах по менеджменту. Оно не использует первичные эмпирические данные, а опирается на систематический обзор и критический анализ существующей литературы.

Поиск проводился в базах Google Scholar и Cairn.info по ключевым словам: marketing for SMEs, customer orientation in Africa, marketing myopia, SMEs in Mali, advertising in developing countries.

Проведенный тематический и сравнительный анализ источников позволил:

1.Уточнить концептуальные границы между маркетингом и рекламой.

2. Выявить преобладающие маркетинговые практики в МСП Мали (на основе кейсов и неопубликованных материалов).

3. Построить теоретическую модель связи между маркетингом, клиентоориентированностью и устойчивым развитием.

Применение данного подхода обуславливается необходимостью создания целостной понятийной структуры, которая может послужить основой для будущих эмпирических исследований.

Принципиальное различие между маркетингом и рекламой

Согласно Котлеру [1], маркетинг – это социально-управленческий процесс, благодаря которому индивиды и группы получают желаемое через создание, предложение и обмен ценностями. Он включает анализ рынка, сегментацию, позиционирование и весь комплекс 4P (продукт, цена, место, продвижение). Реклама же – лишь один из инструментов коммуникационной подсистемы маркетинга. Отождествление целого с его частью приводит к стратегическим ошибкам.

Современные исследования подтверждают, что компании, подменяющие понятие «маркетинг» на понятие «реклама», демонстрируют на 37% более низкую рентабельность инвестиций в течение 18 месяцев [14]. Более того, 83% руководителей МСП признаются, что не видят разницы между этими понятиями и поручают их одному сотруднику с единым бюджетом.

Клиентоориентированность и устойчивая эффективность

Понятие клиентоориентированности восходит к работе Левитта [5] о «маркетинговой близорукости», в которой подвергается критике чрезмерная концентрация на продукте вместо потребностей клиента. Нарвер и Слейтер [2] операционализировали эту конструкцию, показав, что рыночная ориентация (включая ориентацию на клиента, конкурентов и межфункциональную координацию) позитивно влияет на прибыльность. Коли и Яворски [6] также внесли вклад в эту литературу, определив рыночную ориентацию как генерацию, распространение и использование рыночной информации.

В контексте малийских МСП устойчивая эффективность определяется как способность предприятия:

- сохранять финансовую стабильность (рентабельность, положительный денежный поток);

- выстраивать качественные социальные отношения с заинтересованными сторонами;

- адаптироваться к изменениям внешней среды;

- вносить вклад в местное сообщество (рабочие места, передача навыков) [7].

Специфика МСП в развивающихся странах: пример Мали

Малое и среднее предпринимательство (МСП) является основой мировой экономики, обеспечивая занятость и инновации. В развитых странах (США, ЕС, Япония) МСП формирует 50–60% ВВП, фокусируясь на высоких технологиях и услугах, тогда как в развивающихся регионах преобладает торговля. Развитие МСП сейчас направлено на цифровизацию, экологичность (ESG) и государственную поддержку [8].

Малое предпринимательство в Западной Африке – интенсивно развивающийся сектор, с высоким уровнем риска, имеющий важнейшее значение в борьбе с безработицей. Основные стратегические направления развития включают агробизнес, технологии, финтех (финансовые технологии), переработку ресурсов и потребительские услуги. Развитие ограничивается организационно-институциональными барьерами, сложностями с финансированием и высоким уровнем конкуренции.

К ключевым особенностям развития малого предпринимательства в данном регионе можно отнести интенсивную урбанизацию, рост среднего класса (прогнозируется 43% к 2030 году) и цифровизацию экономики, причем, к странам, определяющим это развитие, можно отнести Гану, Сенегал (активное развитие бизнеса) и Республику Мали (агросектор).

Малийские МСП функционируют в условиях доминирования неформальной экономики, сильного влияния традиционных социальных сетей и ограниченного доступа к финансам и знаниям [3]. Управленческая культура характеризуется централизацией решений, низкой специализацией функций и предпочтением быстрых, наглядных действий, унаследованных от устной традиции, где живая коммуникация ценится выше письменного анализа [9].

Компетенции в области маркетингового менеджмента внутри МСП часто ограничены, как отмечают Карсон и Гилмор [10], что усугубляет смешение маркетинга с рекламой. Кроме того, Портер и Крамер [11] напоминают, что создание общей ценности требует глубокого понимания местных потребностей – способности, которую простая реклама не может обеспечить.

1. Реклама как «ложно положительное» решение

В маркетинге действует правило 70/20/10, согласно которому 70% контента МСП должно приносить пользу и способствовать развитию бренда, 20% – быть частью чужого контента, и только 10% занято рекламными материалами. Уже исходя из этих соотношений можно определить место рекламы в контексте рассматриваемой проблемы.

Однако в малийских МСП маркетинг воспринимается преимущественно как набор рекламных акций для повышения узнаваемости и краткосрочных продаж, т.е. понятия маркетинга и рекламы, по сути, объединяются. Стратегические маркетинговые исследования практически не проводятся [3].

Типичные примеры:

Продавец тканей на рынке Бамако использует только личный Facebook для фото новых поступлений, не анализируя ожидания клиентов по узорам, качеству или ценам.

Владелец ресторана в районе Хамдаллае закупает радиоэфирное время, не определив свою целевую аудиторию (работники, Студенты, семьи) и не адаптировав меню.

Агропродовольственная компания в Сегу тратит бюджет на наружную рекламу, не имея структурированной дистрибуции, чтобы потребители могли купить продукт.

2. Слабая организационная формализация маркетинга

Маркетинговая функция редко закреплена в штатном расписании. Её исполняет сам директор, совмещая с продажами и коммуникацией. Маркетинг воспринимается как текущее финансовое бремя, а не стратегическая инвестиция [4]. Недавнее исследование Кейты и Траоре [12] подтверждает, что управленческие практики в Бамако остаются сильно централизованными и малоспециализированными.

3. Низкая ориентация на клиента

Механизмы обратной связи (опросы удовлетворённости, анализ жалоб) отсутствуют. Клиент рассматривается как транзакционный покупатель, что препятствует формированию лояльности [2]. Даже в ремесленном и розничном секторах отзывы клиентов редко собираются системно и не используются для улучшения предложения. Недавний опрос, проведённый Саного А. [15], показывает, что малийские потребители всё более недовольны услугами и товарами, продаваемыми онлайн, из-за отсутствия реального внимания к их нуждам.

Таблица

Сравнение доминирующего рекламного подхода и клиентоориентированного маркетингового подхода

Измерение	Доминирующий рекламный подход	Маркетинговый подход, ориентированный на клиента
Главная цель	Прозрачность и немедленные продажи	Создание устойчивой ценности
Временной горизонт	Короткий срок	Долгосрочная перспектива
Роль клиента	Случайный покупатель	Стратегический партнер
Стратегическая логика	Продайте товар	Удовлетворить потребности клиента
Влияние на производительность	Нестабильный, уязвимый к потрясениям	Прочный, износостойкий

Контекстуальная «маркетинговая близорукость»

Наши результаты подтверждают классический тезис Левитта [5]. Чрезмерный акцент на рекламе заставляет МСП фокусироваться на продукте в ущерб клиенту, снижая адаптивность к рыночным изменениям. В Мали это усугубляется стремлением к быстрой отдаче, централизацией решений и дефицитом специализации [12].

Роль социокультурных факторов

Помимо общеизвестных причин, мы выделяем три специфических фактора.

Устная культура и межличностные связи. В обществе, где информация веками передавалась из уст в уста, видимая и прямая коммуникация (реклама) воспринимается как более естественная, чем абстрактный письменный анализ (маркетинговые исследования) [9].

Сила традиционных сетей. Руководители МСП полагаются на родственные, общинные и религиозные связи для ведения бизнеса. Эта уверенность в «естественных» отношениях ослабляет мотивацию к формализации маркетинга [7].

Культура «débrouille «(находчивость). В условиях экономической неопределённости предприниматели развивают навыки оперативной адаптации, которые, однако, вступают в противоречие с долгосрочным стратегическим планированием, необходимым для подлинной клиентоориентированности [9].

Влияние на устойчивую эффективность

Дефицит квалифицированных маркетологов консервирует понятийную путаницу. Ключевые концепции (сегментация, лояльность, клиентоориентированность) остаются непонятыми, что снижает результативность действий [1, 4]. Отсутствие ориентации на клиента ведёт к:

Финансовым потерям: неэффективные рекламные расходы, перегружающие хрупкий денежный поток [13];

Социальным проблемам: трудности удержания клиентов при низкой покупательной способности [14];

Снижению устойчивости: повышенная уязвимость перед экономическими и конкурентными шоками [11].

Практические рекомендации для руководителей

Для перехода от рекламного мышления к маркетинговому предлагаются три недорогих и реалистичных шага:

1. В качестве усиления развития взаимодействия с клиентом рекомендовать применить (CSI) (Customer Satisfaction Index)- это индекс удовлетворённости клиентов, количественный показатель, используемый бизнесом для оценки того, насколько клиенты довольны продуктом, услугой или конкретным взаимодействием (например, звонком в поддержку). Он измеряется через опросы (оценки от 1 до 5 или 10) и помогает выявлять недостатки, повышать лояльность и снижать отток покупателей.

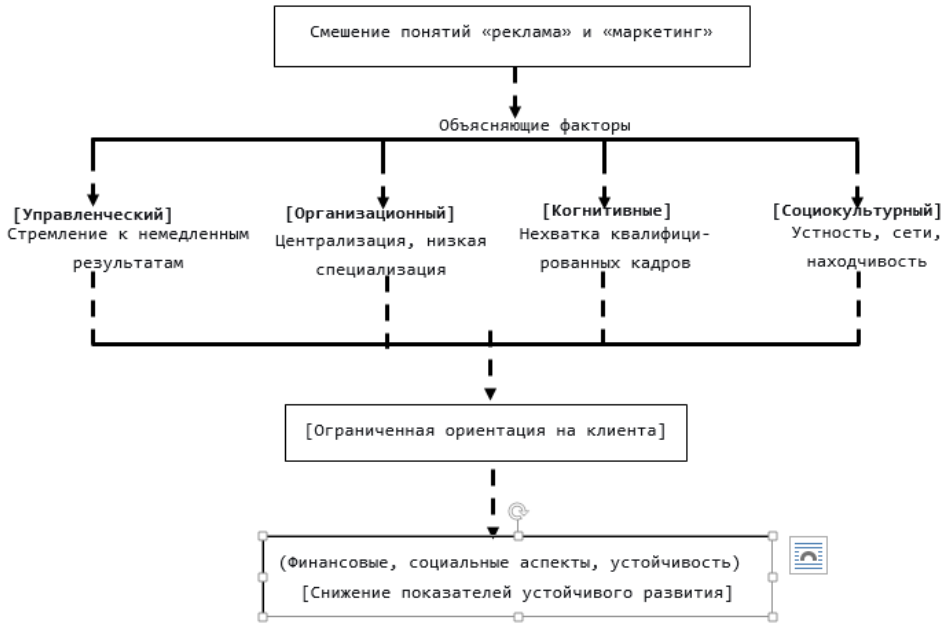


Рис. Концептуальная модель влияния смешения понятий «реклама» и «маркетинг»

Основные аспекты CSI:

Цель: Оценка качества сервиса и продукта, определение проблемных зон.

Показатель CSI дает четкое представление о том, насколько хорошо компания отвечает ожиданиям покупателей, и указывает на аспекты, требующие улучшения. Внимание к CSI не только повышает потребительскую лояльность, но и способствует устойчивому росту вашего бизнеса.

2. Минимальная CRM (Customer Relationship Management) без затрат

Система позволяет использовать бесплатные инструменты (например, Google Контакты, WhatsApp Business с тегами клиентов) для ведения истории покупок и обращений. Это помогает не терять заявки и анализировать эффективность каналов [16].

Программное обеспечение применяется для автоматизации стратегий взаимодействия с клиентами, которое упорядочивает базу данных, хранит историю сделок, фиксирует звонки и сообщения, а также автоматизирует рутинные задачи (рассылки, счета). Оно помогает не терять заявки, увеличивать продажи и анализировать эффективность работы.

Основные возможности CRM-системы:

Единая клиентская база: Вся информация, контакты и история общения с клиентом хранятся в одном месте.

Автоматизация продаж: Управление воронкой продаж, автоматическое создание задач для менеджеров, напоминания о звонках.

Фиксация всех обращений:

Запись звонков, писем и переписок из мессенджеров, объединение их в единой карточке клиента

Аналитика и отчетность: Контроль работы сотрудников, анализ эффективности рекламных каналов и прогнозирование продаж.

3. Регулярные «часы клиента»

Раз в месяц проводить неформальную встречу с 5–10 постоянными клиентами (с угощением) для сбора предложений. Это заменяет дорогостоящие фокус-группы [15].

Заключение, ограничения и направления будущих исследований

Проведённый анализ показал, что подмена понятия маркетинга понятием рекламы существенно ограничивает способность малийских МСП развивать клиентоориентированность и обеспечивать устойчивость. Помимо управленческих и организационных факторов, важную роль играют социокультурные особенности: устная традиция, опора на неформальные сети и культура быстрой адаптации [9, 7]. Переосмысление маркетинга как стратегического процесса создания ценности является необходимым условием

обеспечения конкурентоспособности МСП Республики Мали [11].

Ограничения. Предложенные объяснительные механизмы требуют эмпирической верификации через полевые исследования.

Будущие исследования. Необходимы углублённые кейсы по разным секторам малийской экономики, крупномасштабное количественное измерение клиентоориентированности, а также сравнительный анализ с соседними странами Западной Африки (Сенегал, Кот-д'Ивуар, Буркина-Фасо).

Список литературы

1. Kotler, P., & Keller, K. L. (2016/2017). Marketing Management (15-е изд.). Pearson. https://elibrary.mel.org/record=b38808110
2. Narver, J. C., & Slater, S. F. (1990). Влияние рыночной ориентации на прибыльность бизнеса. Journal of Marketing, 54(4), 20–35. https://doi.org/10.1177/002224299005400403
3. ОЭСР (2023). Перспективы развития МСП и предпринимательства 2023. Издательство ОЭСР. https://www.oecd-ilibrary.org/industry-and-services/oecd-sme-and-entrepreneurship-outlook-2023_342b8564-en
4. ЮНИДО (2022). Малые и средние предприятия и конкурентоспособность в развивающихся странах. https://www.unido.org/our-focus/advancing-economic-competitiveness/sme-development
5. Levitt, T. (1960). Маркетинговая близорукость. Harvard Business Review, 38(4), 45–56. https://store.hbr.org/product/marketing-myopia/75507
6. Kohli, A. K., & Jaworski, B. J. (1990). Рыночная ориентация: конструкция, исследовательские положения и управленческие последствия. Journal of Marketing, 54(2), 1–18. https://doi.org/10.1177/002224299005400201
7. Lee, C. M. J., Che Ha, N., & Syed Alwi, S. F. (2021). Сервисная ориентация на клиента и социальная устойчивость: пример малых и средних предприятий. Journal of Business Research, 122, 751–760. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.06.019
8. Подбиралина Г.В., Мигалева Т.Е. Малый и средний бизнес зарубежных стран и Росси: учебник, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова- М.: Издательство КноРус, 2026г.- 201 стр., ISBN:978-5-406-07048-2
9. Hernández, E.-M. (2019). Предпринимательство в Африке: культура, ограничения и развитие. L'Harmattan. https://www.editions-harmattan.fr/livre-

entrepreneuriat_en_afrique_culture_contraintes_et_developpement-9782343176114-59244.html

10. Carson, D., & Gilmore, A. (2000). Компетенции управления маркетингом в МСП. International Business Review, 9(3), 363–382. https://doi.org/10.1016/S0969-5931(00)00006-8

11. Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Создание общей ценности. Harvard Business Review, 89(1/2), 62–77. https://hbr.org/2011/01/the-big-idea-creating-shared-value

12. Keïta, M., & Traoré, A. (2023). Управленческие практики и эффективность МСП в Бамако. Малийский журнал управленческих наук, 1(1), 12–28. https://revuechercheur.com/

13. Butkouskaya, V., Llonch-Andreu, J., & Alarcón-del-Amo, M.-C. (2024). Рыночная ориентация, интегрированные маркетинговые коммуникации и эффективность МСП. European Research on Management and Business Economics, 30(3), 84–96. https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2024.100256

14. Hazzam, J., Dobson, P., Singh, B., Blend, I., & Aljarah, A. (2025). Цифровые маркетинговые возможности и эффективность МСП. Journal of Research in Marketing and Entrepreneurship. https://www.emerald.com/insight/publication/issn/1471-5201

15. Sanogo, A. (2025, 19 января). Продажи онлайн: клиенты всё более недовольны услугами и товарами. Studio Tamani. https://www.studiotamani.org/2025/01/19/vente-en-ligne-des-clients-de-plus-en-plus-insatisfaits-des-services-et-produits/

16. Министерство торговли США (2026). Мали – факторы и методы продаж. *Trade.gov*. https://www.trade.gov/country-commercial-guides/mali-selling-factors-and-techniques

Петухов С.Л.
к.т.н., доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
p_sl@bk.ru
Соловьева В.С.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
solovievabar@gmail.com

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ КОНТРОЛЬНЫХ ИНДИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Повышение корректности проведения лабораторных исследований является актуальной задачей и во многом определяется эффективностью контроля сроков хранения и применения приготовленных химических растворов и реактивов, а также среды проведения испытаний. Предметом исследования является решение задачи повышения качества услуг испытательной лаборатории за счет усовершенствования процедуры контроля срока годности и применяемости расходных материалов, используемых при проведении испытаний. Целью исследования является разработка визуально интерпретируемой маркировки годности в виде контрольных индикаторов. Рассматриваются суще-

ствующие контрольные химические индикаторы и их применение, представлены требования для разработки опытного образца контрольного индикатора чувствительного к кислороду воздуха. Определены условия и внешние воздействующие факторы способные исказить результаты разработки и ограничивающие условия применения разрабатываемого контрольного индикатора. В результате сравнительного анализа выбраны варианты основного компонента (реактив чувствительный к воздействию кислорода воздуха) на основе которого будет разработан опытный образец контрольного индикатора. Практическое применение исследования позволит повысить качество предоставляемых услуг испытательной лаборатории и надежность результатов испытаний с использованием расходных материалов.

Ключевые слова: лабораторные исследования, индикаторы, химические реактивы, контроль срока годности, визуальная маркировка, достоверность результатов.

Petukhov S.L.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Technology and equipment of mechanical engineering
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
p_sl@bk.ru
Soloveva V.S.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
solovievabar@gmail.com

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF CONTROL INDICATORS TO IMPROVE THE RELIABILITY OF LABORATORY STUDIES

Abstract. Improving the accuracy of laboratory studies is an important task. It largely depends on effective control of the storage time and proper use of prepared chemical solutions and reagents. It also depends on the conditions in which the tests are performed. The subject of this research is improving the quality of testing laboratory services. This is achieved by enhancing the procedure for monitoring the shelf life and applicability of consumable materials used in testing. The aim of the study is to develop a visually interpretable shelf-life labeling system. This system is based on control indicators. Existing chemical indicators and their applications are reviewed. Requirements for developing a prototype of a control indicator sensitive to atmospheric oxygen are presented. The study identifies environmental conditions and external factors that may affect the results. These factors also limit the application of the developed indicator. A comparative analysis was carried out to select the main component. This component is a reagent sensitive to oxygen exposure. It will be used to develop a prototype of the control indicator. The practical application of this research can improve the quality of laboratory services. It can also increase the reliability of test results when using consumable materials.

Keywords: laboratory studies, indicators, chemical reagents, shelf-life control, visual labeling, reliability of results.

Деятельность аккредитованной испытательной лаборатории строго регламентирована федеральным законом № 412-ФЗ [1], стандартами ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [2] и критериями Росаккредитации. Ключевые

требования относятся к разработке и поддержанию системы менеджмента качества (СМК), ведению деятельности в строго определенных рамках утвержденной номенклатуры испытаний (области аккредитации), квалификации и компетентности специалистов, подтверждению точности и достоверности результатов через участия в межлабораторных испытаниях и надлежащей материальной базе. Материальная база включает в себя комплекс поверенных средств измерений, аттестованное оборудование, расходные материалы и комплектующие, необходимые для ведения деятельности лаборатории. Для каждого ключевого направления в рамках СМК разрабатываются документированные процедуры, обеспечивающие достижение однозначных и достоверных результатов [3].

Для лаборатории, использующей химические растворы и реактивы одним из пунктов обеспечения качества испытаний является контроль сроков хранения и применения приготовленных растворов и сред [4]. При обобщении и анализе методов работы профильных лабораторий следует, что контроль осуществляется по следующим источникам:

- данные в нормативной документации (ГОСТ\ISO, ОСТ, ТУ, инструкция по эксплуатации);
- данные производителя\ поставщика в паспорте или сертификате на расходный материал;
- журналы учета расходным материалов;
- маркировка тары с расходным материалом.

При этом сотрудник-исполнитель оценивает возможность применения расходного материала непосредственно при подготовке к проведению испытания по маркировке на таре. Если данная маркировка отсутствует, проверяется сертификат или паспорт, далее следует обращение к нормативной документации на материал. В последнее время для промышленно выпускаемых химических реактивов и растворов широкое применение получило нанесение на тару QR-кодов содержащих ссылку на паспорт качества и другую эксплуатационную документацию [5].

Для растворов и смесей приготовленных самостоятельно в лаборатории маркировку на тару в виде бирки или надписи наносит сам ответственный исполнитель, также назначенным ответственным или самим исполнителем заполняется журнал учета расходных материалов [6]. Основные этапы жизненного цикла реактивов и растворов, применяемых в испытательной лаборатории приведены на рисунке. Из-за влияния человеческого фактора (описки, особенности почерка, ошибки) такая маркировка является потенциальным риском при оценке возможности применения реактива, а следовательно достоверности результатов.

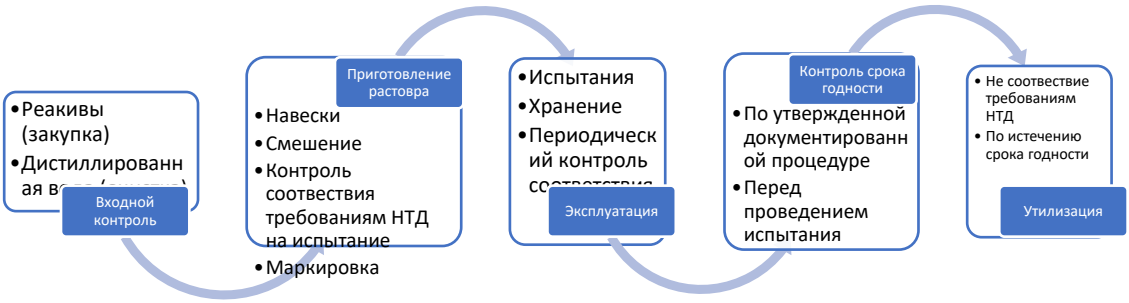


Рис. Схема жизненного цикла расходных материалов в лаборатории, на примере раствора

В концепции управления качеством «Бережливое производство» давно зарекомендовал себя метод визуального менеджмента, где визуальные сигналы (графики, маркировка, сигнальные знаки) применяют для мгновенной оценки состояния процессов и отклонений [7]. Применение визуально считываемой маркировки в виде контрольного индикатора меняющего внешний вид (окраску) за установленный период времени потенциально может повысить качество услуг, надежность и достоверность результатов. Такой индикатор может быть полезен в любой области для контроля временного интервала пригодности расходных материалов, отслеживания периода технического обслуживания оборудования или замены комплектующих.

Химические индикаторы чувствительные к воздействию факторов внешней среды широко известны и применяются в промышленности, например:

– кислотно-основные индикаторы для определения pH растворов, основанные на принципе смещения протолитического равновесия [8];

– термохромные индикаторы температурного воздействия для контроля соблюдения температурного режима, основанные на изменении структуры веществ под воздействием температуры, что приводит к изменению их спектра поглощения света [9];

- химические индикаторы ультрафиолетового (УФ) воздействия, тест-системы на основе светочувствительных веществ, меняющих структуру за счет фотохимических превращений под воздействием УФ-лучей [10];

- химические индикаторы влажности, цвет которых меняется при контакте с водой или превышении уровня влажности, из-за изменения структуры веществ при гидратации или физическом растворении и растекании красителя в составе [11];

- воздействие отдельных химических веществ, например колориметрические датчики углекислого газа CO (угарного газа), содержащие соли тяжелых металлов, оказывающие влияние на изменение цвета индикатора [12].

Условия хранения расходных материалов, химических реактивов и растворов довольно строгие и в основном исключают нагрев, охлаждение, по-

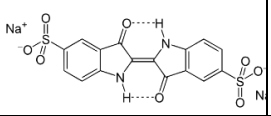
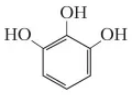
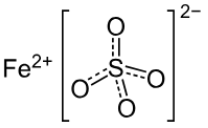
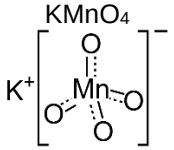
вышенную влажность и воздействие прямых солнечных лучей или агрессивных химических сред, поэтому в качестве воздействующего фактора в рамках исследования выбран кислород воздуха.

Первая серия экспериментов проводилась с пигментами красителями которые используются для окрашивания полимерных материалов, но обладают низкой красящей способностью (укрывистостью) и низкой светочувствительностью, не более 5 единиц [13]. Оценка снижения интенсивности окрашивания или обесцвечивания спустя месяц не подтвердила экспериментальные данные с прямым воздействием кислорода. Разницы между исходным герметично упакованным образцом и оставленными в контакте с окружающей средой за 30 календарных дней не выявлено.

Для второй серии эксперимента выбраны вещества, вступающие в качественные реакции с кислородом. Некоторые свойства исследованных соединений, представляющих наибольший интерес, приведены в таблице 1 [14].

Таблица 1

Свойства исследованных соединений

Наименование	Формула, структура	Цвет исходного вещества/ раствора	Влияние кислорода воздуха	Ориентировочная стоимость [15], руб/кг.
Индигокармин (динатриевая соль индиго-5,5-дисульфокислоты)	$C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ 	Желтый или красный в зависимости от стабили-заторов	Возвращает синий цвет	12 000 – 15 000
Пирогаллол (1,2,3-тригидроксибен-зол; пирогалловая кислота)	$C_6H_3(OH)_3$ $C_6H_6O_3$ 	Прозрачный	Темнеет до коричневого	45 000 – 50 000
Соли железа **(II)** (сульфат железа, железо сернокислое (II)	$FeSO_4$ 	Прозрачный или зеленый	Темнеет до коричневого	300 – 1 000
Перманганат калия (калий марганцовокислый) **(!) Прекурсор**	$KMnO_4$ 	Малиновый или фиолетовый	Обесцвечивание, при наличии спиртов в среде	1 500 – 2 000

Из-за высокой стоимости и сложности с приобретением некоторых реактивов дальнейшая разработка предполагается с использованием индигокармина и сульфата железа (II).

Проверка эффективности состоит из:

Сравнения стабильности растворов и изменения цвета окрашенных образцов фильтровальной бумаги с разной концентрацией для каждого красителя в нормальных условиях в течении 7 суток;

Сравнения стабильности и изменения цвета образцов навесок с одинаковой концентрацией красителя при воздействии кислорода из баллона в течении 10 с.

Сравнения скорости и полноты изменения цвета или обесцвечивания окрашенных образцов фильтровальной бумаги с одинаковой концентрацией между исходным герметично упакованным образцом и оставленными в контакте с окружающей средой за 30 календарных дней

Для определения требований к образцу контрольного индикатора необходимо учитывать условия эксплуатации и внешние воздействующие факторы способные исказить результаты и ограничивающие условия применения. В ходе дальнейшей работы планируется исследовать влияние повышенной среднегодовой комнатной температуры (35±5) °С, повышенной (75±5)% и пониженной (20±5)% относительной влажности, а также воздействия солнечного света (экспозиция в камере светопогоды).

Основные требований к разрабатываемому образцу контрольного индикатора приведены в таблице 2.

Таблица 2

Перечень основных требований к разрабатываемому образцу контрольного индикатора

Параметр	Условие	Значение
Контрольный временной интервал индикатора	Равномерное изменение цвета или обесцвечивание через установленный промежуток времени	(30±2) дней
Размер	Компактность, для размещения на таре в виде банки, колбы или флакона с реактивом \раствором.	Полоса или диск с клеевым слоем, наибольшая сторона или диаметр которого не превышает 15 мм
Прочность	Достаточная для закрепления на таре с реактивом или раствором, предотвращение механического разрушения при эксплуатации или расслаивания элементов образца друг от друга	При использовании не отделяются слои, состав не остается на контактных поверхностях и не осыпается.
Упаковка	До начала эксплуатации герметичная, исключающая реакцию с кислородом воздуха.	Блистер, единичный пластиковый кейс, упаковка в зип-пакет.
* Наличие контрольной зоны	Для оценки срабатывания индикатора, требуется сохранение контрольной зоны или участка поверхности, защищенной от протекания реакции.	В центре или по краю образца остается зона, защищенная от взаимодействия с кислородом воздуха.

Таким образом в статье рассмотрены методические основы повышения эффективности и достоверности лабораторных исследований, приведены

результаты экспериментальных исследований, позволившие выбрать основной компонент, который будет положен в основу опытного образца контрольного индикатора.

Список литературы

1. Федеральный закон от 28.12.2013 № 412-ФЗ (ред. действующая) «Об аккредитации в национальной системе аккредитации».
2. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
3. Лаврова Н.А. Основные вопросы менеджмента качества испытательной лаборатории. – М., 2023.
4. Терещенко А.Г., Пикула Н.П. Внутрилабораторный контроль качества химического анализа. – Томск, 2017. – 84 с.
5. Юрасова А.А., Макарова А.С., Козлов А.Д. Паспорт безопасности и предупредительная маркировка химической продукции // Безопасность труда в промышленности. – 2019.
6. Притчард Э., Барвик В. Контроль качества в аналитической химии. – СПб.: Профессия, 2015. – 162 с.
7. Цифровизация маркировки продукции и применение QR-кодов // Стандарты и качество. – URL: https://ria-stk.ru/stq/adetail.php?ID=181078 (дата обращения: 29.04.2026).
8. Еремин В.В., Борщевский А.Я. Основы общей и физической химии. – М.: Дрофа, 2014. – С. 66–81.
9. Черкасова Е.В., Осипенко А.А. Химические термоиндикаторы // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 1.
10. Патент РФ № 2116634 C1. Способ получения индикаторного материала. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2116634C1/ru (дата обращения: 29.04.2026).
11. Патент РФ № 2508084 C2. Индикатор контроля условий среды. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2508084C2/ru (дата обращения: 29.04.2026).
12. Патент РФ № 2649654 C2. Химический индикатор и способ его получения. – URL: https://patents.google.com/patent/RU2649654C2/ru (дата обращения: 29.04.2026).
13. Медяк Д.М., Трусевич Н.Э. Исследование стойкостных свойств специальных печатных красок // Труды БГТУ. Сер. 4: Принт- и медиатехнологии. – 2020. – № 1. – С. 11–16.
14. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. – Л.: Химия, 1978.
15. Каталог химических реактивов. – URL: https://lenreactiv-shop.ru/ (дата обращения: 29.04.2026).

Ямбаева М.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Marika1231@yandex.ru
Петухов С.Л.
к.т.н., доцент кафедры «Технологии и оборудование машиностроения»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
p_sl@bk.ru

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ

Аннотация. В статье рассматривается подход оценки рисков, как систематический процесс, который направлен на повышение эффективность деятельности предприятия. С целью оптимизации процессов в системе менеджмента качества (СМК) для эффективности производства организации рекомендуется включить методические подходы по анализу рисков на предприятии в документированные процедуры организации. Определение методов по выявлению рисков для организации это ключевой процесс, который позволяет выявить угрозу и уязвимости, влияющие на эффективность работы деятельности предприятия. Система мониторинга рисков на предприятии должна быть задокументирована т.е. описана в стандарте предприятия – это обеспечивает руководству постоянно получать сведения о существенных угрозах и возможностях, требует тщательного планирования процессов. Мониторинг рисков должен быть встроен в общую систему управления, где входит планирование, сбор информации, систематический анализ и контроль. Это позволяет предприятию повышать устойчивость и достигать поставленных целей.

Ключевые слова: риск, управление рисками, количественный анализ, качественный анализ, вероятность возникновения, степень воздействия, величина потерь, уровень риска.

Yambaeva M.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Marika1231@yandex.ru
Petukhov S.L.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Technology and equipment of mechanical engineering»
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
p_sl@bk.ru

A METHODICAL APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN AN ENTERPRISE

Abstract. The article considers the risk assessment approach as a systematic process that to improve the efficiency of an enterprise. In order to optimize the processes in the quality management system (QMS) for the organization’s production efficiency, it is recommended to include methodological approaches to rick analysis at the enterprise in the organization’s documented procedures. Defining methods to identify risks for an organization is a key process

that allows you to identify threats and vulnerabilities that affect the effectiveness of an enterprise. The risk monitoring system at the enterprise should be documented, i.e. described in the enterprise standard. This tonsures that management constantly receives information about significant threats and opportunities, and requires careful process planning. Risk monitoring should be integrated into the overall management system, which includes planning, information collection, systematic analysis and control. This allows the company to increase its sustainability and achieve its goals.

Keywords: risk, risk management, quantitative analysis, qualitative analysis, probability of occurrence, degree of impact, magnitude of losses, risk level.

На основе анализа внешней среды, требований заинтересованных сторон и состояния внутренней среды предприятие формирует стратегический курс развития. Стратегия развития строится на понимании того, что глобальная экономика вступила в абсолютно новую эпоху все более частых и интенсивных периодов турбулентности. В условиях неопределенности приходится сталкиваться с широким набором рисков вне зависимости от масштаба деятельности и территории базирования. Такие условия формируют новые подходы к управлению предприятием, основанные в том числе и на учете рисков. С целью обеспечения уверенности в том, что СМК может достичь намеченных результатов, уменьшения нежелательного влияния рисков и достижения улучшений на предприятии применяется концепция приемлемого риска. [1]

Концепция приемлемого риска основана на двух утверждениях:

- признание невозможного полного устранения факторов риска;
- существование возможности найти меры снижения воздействия факторов риска на деятельность предприятия до приемлемого уровня.

Управление рисками – процесс подготовки и принятия мероприятий, цель которых – снижение опасности принятия ошибочных решений и уменьшение возможных негативных последствий нежелательного развития событий в ходе реализации принятых решений или управление рисками – система экономических отношений, направленная на снижение неопределенности в ситуации конкретного выбора. [2]

Система управления рисками – совокупность элементов организационной структуры предприятия взаимосвязанных функциями управления рисками, обеспечивающих реализацию процедур управления рисками техническими, информационными, кадровыми средствами и методическим обеспечением.

На предприятии сравнительный анализ используемых методов оценки рисков позволил выделить два подхода: количественный и качественный. [2]

Основная специфическая особенность качественного подхода в исследовании рисков состоит в том, что сначала проводится идентификация рисков проекта, а затем стоимостная оценка последствий риска и разработанных мероприятий по борьбе с ним. Качественный анализ должен проводиться на стадии планирования деятельности.

Количественный анализ, базирующийся на инструментарии теории вероятности и математической статистики, состоит в числовом измерении, влиянии изменений рисковых факторов проекта на изменение эффективности проекта и опирается на базисный вариант бизнес-плана проекта и проведенный качественный анализ.

За идентификацию всех возможных рисков отвечает качественный анализ, который определяет факторы риска, последовательность работ, при выполнении которых возникает риск и т.д.

За выявление размера ущерба от различных подвидов риска отвечает количественный анализ, который выявляет причины, источники риска и величину вероятных последствий.

На рисунке 1 обозначены процедуры, применяемые для анализа рисков.

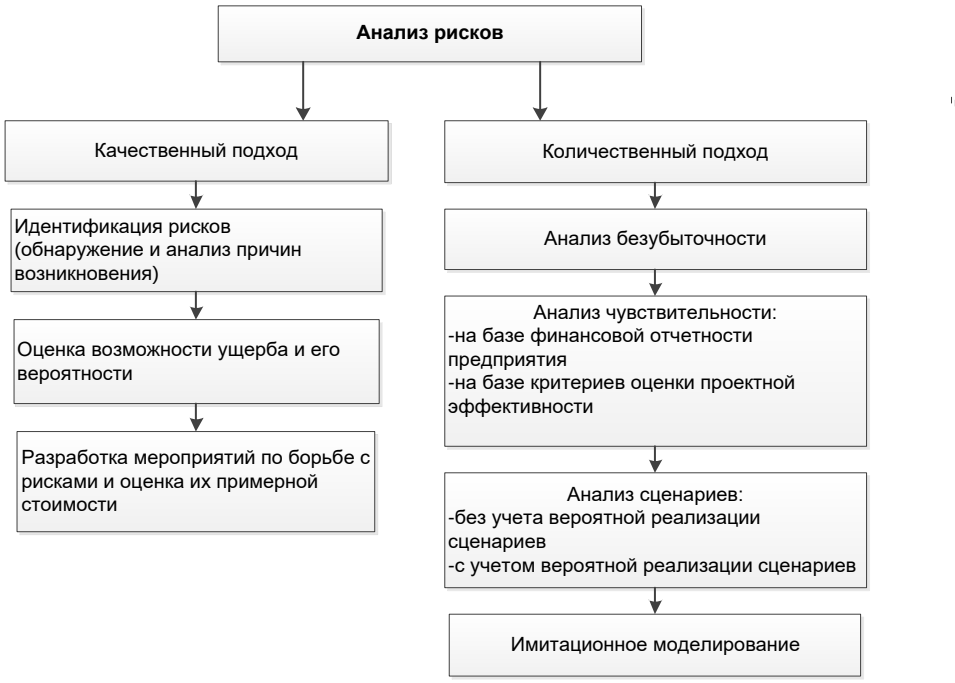


Рис. 1. Процедуры анализа рисков

Качественная оценка рисков

К методам качественной оценки относятся, прежде всего, экспертные методы. Упрощенный алгоритм технологии экспертного оценивания рисков представлен на рисунке 2.

Количественная оценка рисков с использованием метода, основанного на матрице «Вероятность – Потери». Основное преимущество данного метода, кроме общей наглядности и простоты, состоит в том, что его применение позволяет получить подробное представление о негативных ситуациях и последствиях, возможных в будущем. При этом информация о вероятности возникновения и величине потерь от возможного проявления, которая

имеется по каждому идентифицированному риску, комбинируется в специальной матрице, что наглядно показывает степень воздействия каждого риска на ход реализации проекта и его уровень. [3]

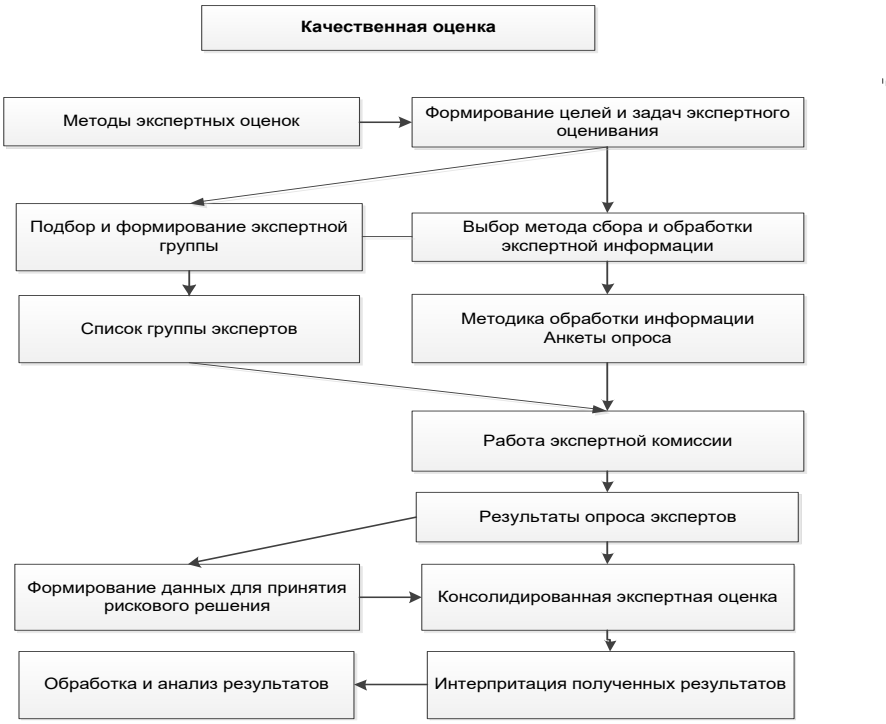


Рис. 2. Алгоритм технологии экспертного оценивания рисков

Процесс оценки рисков представлен на рисунке 3.

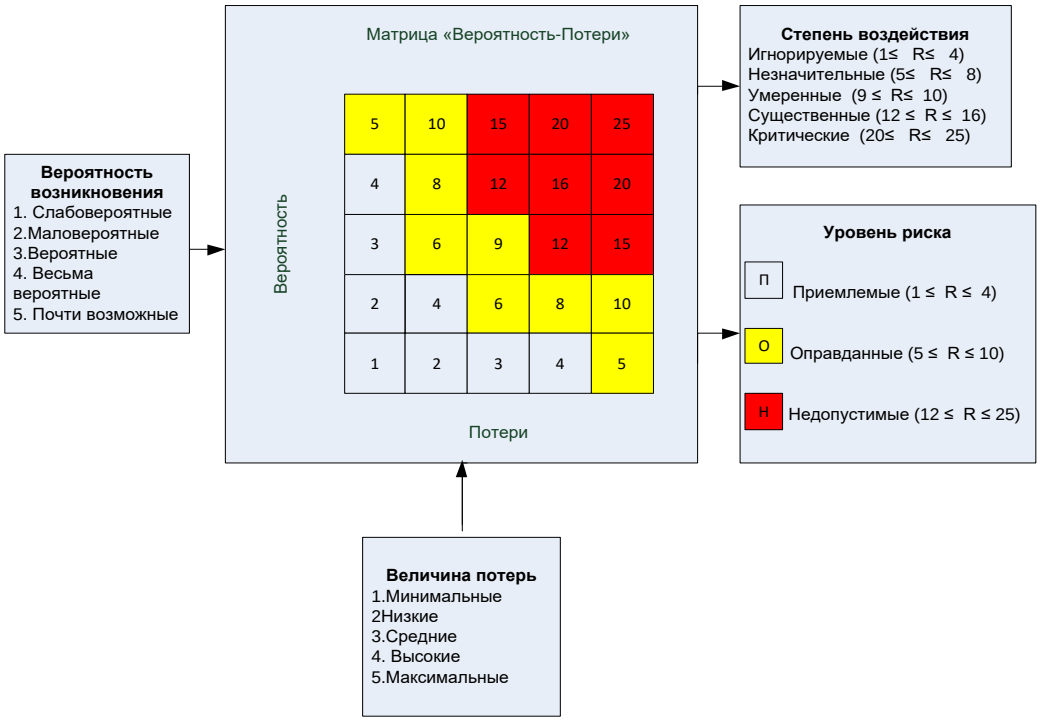


Рис. 3. Процесс оценки рисков в ходе реализации проекта

Каждому интервалу на шкале вероятностей и шкале потерь присваивается значение в баллах от одного до пяти. То есть, например, вероятность возникновения 0,9 для почти возможных рисков оценивается в 5 баллов, а вероятность возникновения от 0,1 до 0,4 для маловероятных рисков – два балла, и так далее. Вместе с этим возможные потери более 90%, но менее 100% плановой прибыли по объекту для максимальных рисков оцениваются в пять баллов, а, например, возможные потери более 40%, но менее 60% плановой прибыли по объекту для средних рисков оцениваются в три балла, и так далее.

Для каждого идентифицированного риска определяются соответствующая величина возможных потерь и вероятность возникновения в баллах, которые означают соответствующую строку и столбец в матрице «Вероятность- Потери» и на пересечении которых получаем ячейку со значением индекса риска R.

Индекс риска является показателем величины вероятных потерь в баллах, рассчитывается по формуле 1 и дает возможность судить о степени воздействия и уровне риска.

$R = P_q \times I_q$ (1)

Следовательно, для маловероятного риска (Pq=2 балла) с ожидаемой средней величиной потерь (Iq=3 балла) посредством матрицы «Вероятность-Потери» получаем значение индекса риска, равное шести баллам. Это позволяет сделать вывод о том, что уровень данного риска является оправданным (оправданный риск), а степень воздействия является незначительной. Здесь необходимо сделать пояснения о том, что такое степень воздействия и уровень риска.

Под степенью воздействия понимается величина вероятных потерь, характеризующая негативный эффект воздействия на ход реализации проекта от наступления ситуации, связанной с риском. Иными словами, степень воздействия конкретизирует серьезность возможных в будущем негативных ситуаций и показывает будущее развитие событий в процессе реализации проекта (таблица 1). При этом величина вероятных потерь может выражаться не только через индекс риска. Количественно степень воздействия рисков (М) выражается в денежных единицах или процентах от плановой себестоимости проекта и рассчитывается как математическое ожидание потерь по формуле 1

$$M = P \times I \quad (1)$$

Таблица 1

Классификация рисков по степени воздействия

Риск	Индекс риска (R)	Степень воздействия
Критический	20 ≤ R ≤ 2 5	Крайняя степень возможности приостановки реализации инвестиционного проекта
Существенный	12 ≤ R ≤ 16	Увеличение продолжительности выполнения работ, производственный брак, несоблюдение решений, объемы дополнительных работ и нарушения техники безопасности, недопустимые для заказчика
Умеренный	9 ≤ R ≤ 10	Увеличение продолжительности работ, производственные дефекты, несоблюдение решений, объемы дополнительных работ и общее снижение безопасности, требующее согласований с заказчиком
Незначительный	5 ≤ R ≤ 8	Увеличение продолжительности работ и объемов дополнительных работ в рамках бюджета и плановых сроков завершения, производственные дефекты быстро устранимы, несоблюдение решений и незначительное снижение безопасности, допустимое для заказчика
Игнорируемый	1 ≤ R ≤ 4	Отсутствие, какого-либо воздействия на ход реализации инвестиционного проекта

Уровень риска характеризует степень его допустимости для организации и показывает место каждого риска в очереди на обработку (таблица 2), то есть недопустимые риски обрабатываются первыми, оправданные риски – вторыми, а приемлемые – последними. Таким образом, чтобы оценить вероятные потери, необходимо рассчитать степень воздействия каждого риска, а чтобы знать о необходимости обработки – уровень каждого риска. При этом в процессе обработки рисков снижается степень их воздействия до приемлемого уровня.

Таблица 2

Классификация рисков по уровням

Риск	Индекс риска (R)	Уровень риска
Недопустимый	12 ≤ R ≤ 25	Определяется как риск, первичный для обработки. Каждый риск с недопустимым уровнем должен иметь стратегию обработки, а также настойчиво и непрерывно обрабатываться до тех пор, пока уровень риска не снизится до приемлемого. При этом риск должен под постоянным жестким контролем и его уровень должен периодически переоцениваться
Оправданный	5 ≤ R ≤ 10	Определяется как риск, вторичный для обработки. Каждый риск с оправданным уровнем должен иметь стратегию обработки, а также обрабатываться до тех пор, пока уровень риска не снизится до приемлемого. При этом риск должен находиться под постоянным контролем и его уровень должен периодически переоцениваться
Приемлемый	1 ≤ R ≤ 4	Рассматривается к принятию, периодически переоценивается уровень каждого риска

Классификация способов обработки рисков

После того, как риски идентифицированы и оценены, необходимо сформировать подходы к их обработке посредством анализа различных способов и выбора наиболее приемлемых вариантов для складывающихся обстоятельств реализации инвестиционного проекта.

В настоящее время для управления рисками есть четыре основных способа их обработки: смягчение, принятие, уклонение, передача (таблица 3). Причем существует тенденция к выбору смягчения, как основному способу обработки рисков, без рассмотрения принятия, уклонения и передачи. Это нерациональный подход, так как смягчение рисков не может быть однозначно лучшим способом их обработки. Только беспристрастный анализ всех способов обработки рисков позволяет определить наиболее приемлемый вариант для конкретных условий реализации проекта.

Таблица 3

Основные способы обработки рисков

Способ	Мероприятие
Принятие	Подтверждение возможности негативной ситуации и сознательное решение принять ее последствия и компенсировать ущерб за счет собственных средств
Передача	Перенесение ответственности за управление риском на других участников процесса без устранения источника риска
Уклонение	Полное устранение определенной угрозы или источника риска через исключение потенциальной возможности негативной ситуации
Смягчение	Уменьшение вероятности возникновения и/или величины возможных потерь от наступления негативной ситуации, что способствует минимизации степени воздействия риска. При этом источник риска не устраняется

Таким образом, стратегия обработки рисков состоит из основного способа и составляющих его специальных мероприятий. Сначала определяется способ обработки рисков, затем осуществляются превентивные мероприятия в рамках данного способа. Это позволяет избежать распространенной ошибки, когда выбор варианта обработки рисков осуществляется без предварительной оценки всех четырех основных способов.

В случаях наличия недопустимого риска или когда не позволяют складывающиеся обстоятельства, может быть полезным разработать несколько дополнительных стратегий обработки рисков. В этом случае процесс выбора мероприятий по обработке рисков необходимо производить повторно. Причем резервные стратегии отличаются от основной.

Для каждого идентифицированного и оцененного риска все потенциальные варианты обработки рисков должны подбираться в соответствии со следующими ограничениями:

-есть ли техническая возможность выполнить мероприятия по обработке рисков?

-что является ожидаемым результатом проводимых мероприятий по снижению уровня риска до приемлемой величины?

-хватит ли денежных, материальных, трудовых и иных видов ресурсов для осуществления выбранных мероприятий?

-достаточно ли времени для того, чтобы разработать и осуществить мероприятия по обработке рисков?

-какое воздействие могут оказать мероприятия на техническую сторону выполнения работ? [4]

Рассмотрим подробнее все четыре основных способа обработки рисков.

Принятие. Этот способ обработки рисков используется почти в каждом проекте. Принятие риска – это принятие финансовых последствий неблагоприятных ситуаций и компенсация потерь за счет собственных средств.

Руководство организации может вынести решение о том, что риск подлежит принятию, когда смягчение, передача или уклонение не являются лучшими способами обработки рисков или когда степень воздействия риска была снижена до приемлемого уровня в ходе предыдущих мероприятий по обработке рисков.

В том случае, когда риски подлежат принятию, это не значит, что они игнорируются. Наоборот, необходимо прилагать достаточно усилий для их оценки, что требуется для планирования взаимодействия с риском, а не для попыток снизить вероятность возникновения негативных ситуаций и/или смягчить тяжесть потерь в случае их наступления. При этом риски, определенные к принятию, должны контролироваться в течение всего процесса.

Для успешного принятия риска необходимо выполнить следующие условия:

- создать резервы основных ресурсов (деньги, время, материалы, оборудование, люди и т.д.);

- запланировать действия в случае непредвиденных обстоятельств. Разработка плана таких действий существенно снижает затраты на них, когда чрезвычайные обстоятельства наступают. Подобный план полезен при существовании риска с недопустимым уровнем или, если выбранный иной вариант обработки рисков не является достаточно эффективным.

Передача. Обычно передача риска осуществляется как часть контрактного соглашения, распределяющего или деятельность, связанную с риском, или финансовую ответственность за потери между участниками реализации проекта. Такой способ обработки рисков в настоящее время широко применяется в промышленности.

Контракты могут активно использоваться при передаче ответственности за риски той стороне, которая лучше оборудована системами регулирования их уровня. Для того, чтобы такая сделка была эффективной, стороны должны быть осведомлены об условиях контракта, и передача риска должна быть финансово компенсирована по отношению к дополнительным расходам, которые ожидаются от наличия этого риска.

Страховщик является профессиональным носителем риска. В отличие от соглашений о передаче риска с заказчиком, проектировщиком, субподрядчиками и поставщиками, являющимися только одним из условий контрактов, передача риска страховщику составляет здесь основное содержание контракта. Страхование – это передача финансовой ответственности за риск в момент возникновения страхуемого события и обычно представляет собой обязательство страховщика оплатить ущерб, хотя в условиях контракта должно быть оговорено, что в некоторых случаях страховщик берет на себя обязательство юридического регулирования последствий страхового события, а не прямые платежи.

Поскольку страхование является договорной передачей риска, типы происшествий и условия, при которых страховщик берет на себя ответственность за происшествия, должны быть тщательно оговорены, чтобы установить пределы финансового покрытия.

Когда тип происшествий и условия страхового полиса оговорены, оплата страховой премии обеспечивает источник денежных средств при страховом событии. Таким образом, страхователь заменяет неопределенные затраты, связанные с обработкой рисков, определенным размером страховой премии.

Уклонение. Полное устранение определенной угрозы или определенного риска, которое может быть достигнуто путем внесения изменений в решения по организации производства, в тактико-технические (технические) задания, в решения по охране окружающей среды и технике безопасности, то есть устранение источников недопустимого риска, заменяя их решениями с приемлемым риском.

Смягчение. Это наиболее общий способ обработки рисков, предполагающий активные действия по снижению вероятности возникновения негативной ситуации и /или уменьшению величины возможных потерь в процессе реализации проекта. Проведение упреждающих воздействий более эффективно, чем попытки устранения негативных последствий, случившихся событий. Временные и денежные затраты на смягчение рисков должны быть адекватны степени воздействия рисков.

Полные затраты на смягчение риска можно разделить на затраты по снижению возникновения негативной ситуации и затраты по уменьшению величины потерь от возможного наступления негативной ситуации.

Затраты на снижение вероятностей негативных ситуаций связаны с мерами по предотвращению или снижению частоты неблагоприятных ситуаций. В качестве примера можно назвать системы безопасности для машин и оборудования, защитную одежду, технику безопасности производственных процессов, финансовую ревизию, обучение персонала, противопожарную и тревожные сигнализации, сейфы, ограждения, огнетушители, дублирование регистрационных документов, применение знакомой технологии, привлечение проверенных субподрядчиков и поставщиков. Все это может повлечь за

собой изменение условий реализации проекта таким образом, что вероятность потерь снизится.

На основе представленных выше рекомендаций по снижению степени воздействия рисков до приемлемого для организации уровня предлагается классификация основных способов обработки рисков, используемых в процессе реализации проекта (рисунок 4).



Рис. 4. Классификация основных способов обработки рисков

Документирование процесса управления рисками в области качества на предприятии предполагает:

- карта оценки рисков;
- план мероприятий по управлению рисками;
- отчет по плану управления рисками;
- реестр рисков.

Карта рисков включает в себя данные об идентификации, результатах анализа, оценки и обработке рисков и на основе ее, если выявлен риск, несущий угрозу для предприятия, то далее составляется план мероприятий по управлению рисками и отчет.

План мероприятий по управлению рисками и отчет по плану управления рисками применяют для формирования реестра рисков на предприятии.

На основании информации по значительным рискам формируется реестр рисков в области качества.

Реестр рисков оформляют с целью:

- исключения нежелательных событий и несоответствий;
- обобщения и оценки руководством рисков в области качества при производстве продукции;
- планирование улучшений в области качества общества. [2]

Необходимая информационная база для управления рисками формируется на основе данных, отражающих деятельность предприятия. Полученная информация обеспечивает своевременный анализ возможных рисков и выбрать меры по уклонению от рисков.

Таким образом в статье представлен современный методический подход к анализу рисков на предприятии, что позволяет существенно повысить эффективность реализации системы менеджмента качества

Список литературы

1. Т.Г. Гурнович, Е.А. Остапенко, С.А. Молчаненко Оценка и анализ рисков.:М.: КНОРУС, 2025.
2. Стандарт организации СТО 07514305-4.0-2017 «Руководство по качеству», 2017.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска
4. ГОСТ Р ИСО 31000-2019 Менеджмент риска. Принципы и руководство

Терешонок А.С.
аспирант
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
tereshonokartem99@mail.ru
Феофанов А.Н.
д.т.н., профессор кафедры АСОИиУ
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
feofanov.fan1@yandex.ru

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМ ВРЕМЕНИ В УСЛОВИЯХ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация. В статье рассмотрены существующие методы определения норм времени на выполнение технологических операций. Предлагается метод определения фактических норм времени выполнения технологических операций в условиях опытного производства изготовления стапельной оснастки для авиационной техники (далее – АТ). Опытное производство в данной работе рассматривается как единичное или мелкосерийное согласно типизации по [1]. Рассматриваемое производство оснащено участками с универсальными механообрабатывающими станки (токарными, фрезерными, координатно-расточными и т. п.) и слесарно-сборочными участками, которые не оборудованы промышленными роботами (далее – ПР). Каждый технологический процесс (далее – ТП) изготовления детали или сборочной единицы (далее – ДСЕ) описывается маршрутной картой (далее – МК). Напротив каждой операции в МК располагается штрихкод. В данной работе предлагается фиксация фактических норм времени выполненных операций ТП самими рабочими, выполнившими данные операции. Фиксация происходит через сканирование штрихкодов рядом с операциями в МК. Таким образом осуществляется сбор фактических норм времени выполнения технологических операций по каждому рабочему.

Собранные исторические данные предлагается использовать для увеличения доверия к оперативно-производственным планам производства.

Ключевые слова: норма времени, нормирование операций, оперативно-производственное планирование, опытное производство, единичное и мелкосерийное производство, универсальные станки, механизированная обработка, слесарные операции.

Tereshonok A.S.
Postgraduate Student
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
tereshonokartem99@mail.ru
Feofanov A.N.
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of AIPMS
MSUT «STANKIN»
Russia, Moscow
feofanov.fan1@yandex.ru

METHODS FOR DETERMINING TIME STANDARDS IN PILOT PRODUCTION CONDITIONS

Abstract. The article discusses the existing methods for determining the time standards for performing technological operations. A method is proposed for determining the actual time standards for technological operations in a pilot production facility for the manufacture of slipway equipment for aviation equipment (hereinafter referred to as AE). In this work, pilot production is considered as a single or small-scale production according to the typification of [1]. The production in question is equipped with sites with universal machining machines (turning, milling, coordinate boring, etc.) and locksmith and assembly sites that are not equipped with industrial robots (hereinafter referred to as IR). Each technological process (hereinafter referred to as TP) of manufacturing a part or assembly unit (hereinafter referred to as PAU) is described by a route map (hereinafter referred to as RM). A barcode is placed in front of each operation in the RM. In this article, it is proposed to fix the actual norms of the time of performed TP operations by the workers themselves who performed these operations. The fixation takes place through scanning barcodes next to the operations in the RM. Thus, the actual norms of the time of technological operations for each worker are collected. The collected historical data is proposed to be used to increase confidence in operational production plans.

Keywords: the norm of time, rationing of operations, operational and production planning, pilot production, single and small-scale production, universal machines, mechanized processing, locksmith operations.

Оперативно-производственное планирование выпуска стапельной оснастки для изготовления и сборки АТ является важнейшей задачей при определении срока сдачи готовой продукции. ТП изготовления ДСЕ задается МК. В МК содержится вся необходимая информация для изготовления требуемых ДСЕ: наименование и краткое содержание операций в требуемой последовательности без указания переходов и технологических режимов обработки; укрупненные нормы времени на выполнение каждой операции; требуемый разряд исполнителя для выполнения данной операции в пределах заданной нормы времени. Совокупность всех операций, содержащихся

во всех МК, задает общий объем работы и общее время выполнения заказа. На опытном производстве низкая повторяемость изготавливаемых ДСЕ, что влечет за собой высокую трудоемкость по определению норм времени на технологические операции для выпуска новых, ранее не изготавливавшихся, ДСЕ. В работе [2] приводится доказательство важности возвращения практики нормирования труда на машиностроительные предприятия, что еще раз доказывает актуальность данной работы. Автор работы [3] приводит пример того, что в ОАО «Газпром» охвачено нормированием более 95% рабочих и более 80% – служащих.

Согласно [4] в практике машиностроения нормирование операций выполняется либо на основе технически обоснованных норм времени, либо на основе опытно-статических норм времени:

- технически обоснованные нормы времени – определяются на основе установившегося передового производственного опыта, при полном и рациональном применении всех технологических возможностей имеющегося производства;

- опытно-статические нормы времени – определяются специалистом (нормировщиком, технологом или мастером) по нормированию на основе личного опыта или данных статистического учета, при этом не учитывается опыт передовых производственных рабочих, не происходит тщательного анализа потерь рабочего времени и определения максимальных производственных возможностей.

Из этого следует, что для уменьшения норм времени и увеличения норм выработки следует использовать опыт передовых производственных рабочих, которые могут выполнять конкретную операцию с наибольшей скоростью в течение длительного промежутка времени. Такой подход к нормированию определяет технически обоснованные нормы времени. При использовании таких норм времени, увеличивается производительность труда и прибыль предприятия.

Несмотря на очевидные преимущества использования технически обоснованных норм времени, их реальное использование в условиях опытного производства является невозможным в силу высокой трудоемкости их определения. Такие нормы времени, несомненно, представляют большой интерес для крупносерийного и массового производства, когда наблюдается высокая повторяемость одних и тех же операций. В силу высокой повторяемости операций, появляется возможность для определения наилучшего способа их выполнения и установления сначала временных, а затем и постоянных технически-обоснованных норм времени.

В опытном производстве нет возможности длительно наблюдать за одной и той же операцией и устанавливать для нее технически-обоснованную норму времени. Поэтому в опытном производстве имеет место применение опытно-статических норм времени, которые не учитывают передового производственного опыта и устанавливаются на основе опыта специалиста, вы-

полняющего нормирование операций ТП. Но это не отменяет того, что теоретические нормы времени должны максимально приближаться к фактическим нормам времени.

Авторы работ [5] и [6] предлагают подбор и коррекцию технологических норм на основе опытно-статистического анализа производственных заданий. Их метод заключается в сборе исторических данных по выполнению сменных заданий и сопоставления теоретических с фактическими нормами. На основе этого сопоставления и происходит подбор и коррекция технологических норм времени на операции. При применении этого метода для определения норм времени на операци и в условиях опытного производства существенными недостатками будут:

- дискретность получаемых исторических данных – минимальной единицей разбиения является производственное задание, продолжительность которого равняется продолжительности рабочей смены, при этом нет возможности непрерывного отслеживая фактической нормы времени для каждой операции;

- низкая повторяемость одних и тех же операций – в условиях опытного производства нет возможности точно определять и корректировать нормы времени для каких-то отдельных операций ввиду их низкой повторяемости, поэтому имеет смысл корректировать нормы времени, исходя из того какой специалист производил нормирование операции, и какой рабочий будет выполнять данную операцию.

Использование микроэлементного нормирования на основе Базовой системы микроэлементных нормативов времени 1-го уровня (далее БСМ-1), предлагаемого авторами работ [2], [7] и [9] предполагает разбиение действий рабочего при выполнении технологической операции на микроэлементы. БСМ-1 состоит из 41 микроэлемента: 26 микроэлементов движения рук, 6 – ног, 7 – туловища и 2 – глаз. Использование БСМ-1 в условиях опытного производства без должной автоматизации технологической подготовки производства не представляется возможным в силу высокой трудоемкости такого нормирования труда.

В данной работе для выполнения нормирования труда предлагается использовать усовершенствованный опытно-статистический метод нормирования. Предлагаемый метод заключается в том, чтобы рабочий, выполняющий данную технологическую операцию, самостоятельно фиксировал фактическую норму времени по данной операции в автоматизированной системе контроля и планирования (далее – СКИП).

Фиксация нормы времени происходит через сканирование штрихкода выполняемой операции. Штрихкод однозначно определяет номер МК и номер выполняемой операции, что позволяет однозначно связать выполненную работу с конкретной ДСЕ. Для создания штрихкодов используется символика EAN-13 [8], позволяющая закодировать 12 значащих цифр. Структура штрихкода операции МК приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура данных в штрихкоде операции МК:
Р – резервные цифры; О – номер операции; Н – номер МК; К – контрольная цифра

Первые три цифры, стоящие в крайней левой позиции штрихкода, являются резервными. Следующие три цифры с четвертой по шестую содержат номер операции. Следующие шесть цифр с седьмой по двенадцатую содержат номер МК. Тринадцатая цифра для кодирования данных не используется, т.к. она является контрольной и применяется для повышения надежности распознавания штрихкода.

У каждого рабочего есть личная карточка, которая однозначно идентифицирует его в СКИП. Структура штрихкода личной карточки рабочего приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структура данных в штрихкоде личной карточки рабочего:
П – пароль; Т – табельный номер; К – контрольная цифра

Первые пять цифр, стоящие в крайней левой позиции штрихкода, представляют собой пароль. Следующие семь цифры с шестой по двенадцатую содержат табельный номер.

Оформление МК выполняется в программе MS Excel. Штрихкоды генерируются автоматически напротив каждой операции через специальные макросы. Перерисовка всех штрихкодов в МК, если были какие-то изменения, происходит каждый раз перед: сохранением, выгрузкой в систему, печатью документа. Таким образом достигается невозможность напечатать МК и отдать в работу с неверно сформированными штрихкодами.

После сбора исторических данных, содержащих фактические нормы времени выполнения технологических операций, которые связаны с рабочими, выполнявшими данные операции, появляется возможность их обра-

ботки. После обработки исторических данных, можно определить коэффициент производительности для каждого рабочего и связать данные коэффициенты с:

- временем суток (начало рабочего дня, время перед и после обеда, конец рабочего дня);
- днем недели;
- месяцем года;
- разрядом работы и разрядом рабочего, выполнившего данную работу;
- возрастом и образованием рабочего.

Собрав исторические данные за длительный промежуток времени, не составит большого труда определять норму времени для вновь пришедших рабочих на основе «похожих» на них по определенным критериям (образование, разряд, возраст и т. п.). После этого, полученные в результате обработки данные, можно загрузить в искусственную нейронную сеть для определения наиболее «подходящих» рабочих для выполнения конкретной работы в конкретное время, день недели и месяц года.

В работе были рассмотрены существующие методы определения норм времени технологических операций. С точки зрения точности нормирования, наибольший интерес представляет метод микроэлементного нормирования труда [2], [7] и [9]. При помощи данного метода определяются технически обоснованные нормы времени. Но в опытном производстве его использование невозможно в виду высокой трудоемкости его применения. Поэтому в данной работе был представлен собственный метод определения норм времени на операции через сбор исторических данных при помощи специальной системы, в которой предусмотрено сканирование штрихкодов для фиксации фактических норм времени на выполненные операции. На основе собранных исторических данных будет происходить планирование производства, которое должно повысить уровень доверия к оперативно-производственным планам.

Список литературы

1. ГОСТ 3.1121-84. Единая система технологической документации. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на типовые и групповые технологические процессы (операции) : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 01.01.1986 : Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. Официальное. – Москва : Стандартинформ, 2012 – 48 с.

2. Ануфриева, И. Ю. Трансформация внутриорганизационного нормирования труда в условиях цифровизации [Текст] / И. Ю. Ануфриева // Экономика. Профессия. Бизнес. – 2021. – № 3. – С. 12–18.

3. Омельченко, И. Б., Васьков, А. Б. Системные подходы к нормированию труда: как применять [Текст] / И. Б. Омельченко, А. Б. Васьков // Социально-трудовые исследования. – 2020. – № 4. – С. 8–15.

4. Гальцов, А. Д., Денисюк, И. Н., Левандовский, А. Г., Лосев, А. Г., Пезик, М. О., Петроченко, П. Ф., Савоскин, Н. М., Трубицкий, Г. Р., Хисин, Р. И., Хромилин, В. А. Справочник нормировщика-машиностроителя. Основы технического нормирования. [Текст] / А. Д. Гальцов, И. Н. Денисюк, А. Г. Левандовский, А. Г. Лосев, М. О. Пезик, П.

Ф. Петроченко, Н. М. Савоскин, Г. Р. Трубицкий, Р. И. Хисин, В. А. Хромилин – 1-е изд. – Москва: МАШГИЗ, 1959 – 677 с.

5. Старостин, Н. В., Вернигор, И. С. Алгоритм подбора и коррекции пооперационных технологических норм [Текст] / Н. В. Старостин, И. С. Вернигор // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2024. – № 2. – С. 38–43.

6. Старостин, Н. В., Седаков, Д. В., Свеженцев, А Г., Вернигор, И. С. Модели и алгоритмы поиска оптимальных процессов выверки и коррекции пооперационных технологических норм времени [Текст] / Н. В. Старостин, Д В. Седаков, А. Г. Свеженцев, И. С. Вернигор // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2023. – № 4. – С. 36–50.

7. Максимов, Д. Г. Возникновение и развитие микроэлементного нормирования труда [Текст] / Д. Г. Максимов // Вестник Удмуртского университета. – 2014. – № 1. – С. 68–71.

8. ГОСТ ISO/IEC 15420-2010 Автоматическая идентификация. Кодирования штриховое. Спецификация символики штрихового кода EAN/UPC.

9. Бикбулатов, Р. И., Шакирова, Д. М. Автоматизация системы трудового нормирования [Текст] / Р. И. Бикбулатов, Д. М. Шакирова // СКИФ. Вопросы студенческой науки. – 2022. – № 4. – С. 8–13.

Гиршфельд П.А.
аспирант
ИМАШ РАН
Россия, Москва
pavel.girshfeld@yanex.ru
Ромашова Е.Ю.
младший научный сотрудник
ИМАШ РАН
Россия, Москва
romashova@imash.ru

МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ, ИХ ПРИГОДНОСТЬ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

Аннотация. В современных условиях высокотехнологичного производства, характеризующегося высокой сложностью цепей поставок и ростом технологической неопределённости, традиционные модели систем менеджмента качества (СМК) утрачивают самостоятельную значимость для обеспечения устойчивой конкурентоспособности. Целью данной работы является анализ эволюции подходов к управлению качеством в машиностроении и металлургии, обоснование недостаточности исключительно нормативного соответствия базовым стандартам и формирование прогноза развития отрасли в направлении прогнозного качества и управления рисками на основе данных. В статье исследуются ограничения реактивной парадигмы контроля и концептуальные пределы детерминированных моделей при работе с нелинейными и стохастическими производственными системами. Методология исследования опирается на системный анализ нормативной базы, сравнительное моделирование эволюции парадигм надёжности и синтез концепций проактивного управления вариациями процессов. Результаты показывают, что реальное технологическое лидерство достигается за счёт перехода от пассивного количественного

анализа неопределённостей к активному управлению ими в реальном времени с применением методов прогнозирования технического состояния, цифровых двойников и рискориентированного проектно-процессного подхода. Особое внимание уделено формированию корпоративной культуры приемлемого риска и трансформации роли персонала в условиях цифровой верификации. Полученные выводы демонстрируют объективную необходимость многоуровневой зрелости СМК и опережающего планирования качества для минимизации экономических потерь и обеспечения долгосрочной эффективности предприятий.

Ключевые слова: Системы менеджмента качества, прогнозная аналитика, управление рисками, машиностроение, металлургия, цифровые двойники, культура качества, неопределённость процессов, принципы управления состоянием (PHM), нечеткий ELECTRE III.

Girshfeld P.A.
Postgraduate Student
IMASH RAS
Russia, Moscow
pavel.girshfeld@yanex.ru
Romashova E.Yu.
Junior Researcher
IMASH RAS
Russia, Moscow
romashova@imash.ru

QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS MODELS IN MECHANICAL ENGINEERING AND METALLURGY, THEIR APPLICABILITY FOR ACHIEVING COMPETITIVENESS

Abstract. In the current conditions of high-tech production, characterized by high complexity of supply chains and growing technological uncertainty, traditional models of quality management systems (QMS) are losing their independent significance for ensuring sustainable competitiveness. The purpose of this work is to analyze the evolution of approaches to quality management in mechanical engineering and metallurgy, to substantiate the insufficiency of normative compliance with basic standards, and to form a forecast for the development of the industry in the direction of predictive quality and data-based risk management. The article explores the limitations of the reactive control paradigm and the conceptual limits of deterministic models when working with nonlinear and stochastic production systems. The research methodology is based on a systematic analysis of the regulatory framework, comparative modeling of the evolution of reliability paradigms, and the synthesis of concepts for proactive management of process variations.

Keywords: Quality management systems, predictive analytics, risk management, mechanical engineering, metallurgy, digital twins, quality culture, process uncertainty, principles of state management (PHM), fuzzy ELECTRE III.

В условиях современной глобальной конкуренции и высокой технологической неопределённости машиностроительные и металлургические предприятия сталкиваются с необходимостью пересмотра подходов к обеспечению качества продукции. Традиционные модели систем менеджмента

качества (СМК), построенные исключительно на базовых требованиях международных стандартов, в настоящее время демонстрируют ограничения в обеспечении устойчивой конкурентоспособности. Соответствие таким стандартам часто выступает лишь формальным условием для допуска на рынки, не гарантируя технологического лидерства или экономической эффективности.

Система, ориентированная преимущественно на формализацию процедур и реактивное выявление несоответствий, не способна в полной мере компенсировать риски, связанные с высокими вариациями процессов, сложностью цепей поставок и динамичными требованиями заказчиков. В отрасли наблюдается разрыв между документальным подтверждением соответствия и реальной способностью предприятия предотвращать дефекты на ранних этапах жизненного цикла продукции.

Исторически развитие управления качеством в машиностроении и металлургии опиралось на концепции бездефектного изготовления и комплексного контроля, которые были успешно адаптированы в условиях плановой экономики. Однако переход к рыночным отношениям и интеграция в глобальные производственные цепи потребовали унифицированного подхода, приведшего к повсеместному внедрению базовых систем менеджмента качества. В настоящее время наличие такой системы является необходимым базовым уровнем зрелости, однако для достижения реальных конкурентных преимуществ требуется переход к рискориентированным моделям управления, интегрированным с процессами перспективного планирования, статистического управления и оптимизации вариативности.

Целью данной работы является анализ эволюции моделей управления качеством в машиностроении и металлургии, обоснование недостаточности исключительно нормативного соответствия базовым стандартам в современных условиях и формирование прогноза развития отрасли в направлении прогнозного качества и управления рисками на основе данных. Для достижения цели поставлены следующие задачи: рассмотреть исторические предпосылки формирования современных подходов к качеству; проанализировать ограничения традиционных СМК в условиях высокорисковой среды; раскрыть сущность рискориентированного подхода и прогнозной аналитики как ключевых факторов конкурентоспособности

Исторический анализ развития систем управления качеством демонстрирует последовательную эволюцию от жестко регламентированных нормативных подходов к адаптивным моделям. В середине прошлого века на машиностроительных предприятиях сформировалась концепция бездефектного изготовления продукции (БИП), которая перевела качество из плоскости абстрактных контрольных операций в категорию личной экономической ответственности исполнителей [5].

Развитие этой логики привело к созданию комплексных систем управления качеством продукции (КС УКП), представлявших собой прообраз со-

временных интегрированных систем менеджмента. Однако влияние плановой экономики, избыточность документации и низкая гибкость нормативной базы со временем привели к их формализации, превратив в многотомный бумажный документооборот [5].

Переход к рыночным отношениям и необходимость интеграции в глобальные производственные цепи потребовали унифицированного языка управления, что обусловило повсеместное внедрение стандартов серии ISO 9000. Данные стандарты предложили чёткую, воспроизводимую структуру систем менеджмента качества, ориентированную на документирование процессов, сквозную прослеживаемость и удовлетворённость потребителя [5].

В современных условиях отраслей с высокой сложностью производственных циклов, таких как машиностроение и металлургия, базовые стандарты первого уровня перестали быть самостоятельным инструментом обеспечения конкурентоспособности. Традиционные модели, преимущественно ориентированные на выявление и документирование уже возникших несоответствий, не способны в полной мере компенсировать риски, связанные с высокими вариациями процессов и технологической неопределённостью [1].

Традиционный контроль, ориентированный на отбраковку продукции и формальное оформление корректирующих действий, не выявляет системные причины вариаций процессов и запаздывает относительно момента зарождения дефекта. В условиях современных сложных систем, обладающих свойствами нелинейности, стохастизма и склонности к бифуркациям при малейших возмущениях начальных условий, классические детерминированные подходы достигают своих концептуальных пределов [4].

Современные исследования подчёркивают, что парадигма инженерного обеспечения надёжности должна трансформироваться от пассивного количественного анализа неопределённостей (UQ) к активному управлению ими в реальном времени (UC), обеспечивая сохранение работоспособности системы в условиях неполных данных и сложного взаимодействия компонентов [2].

Анализ эволюции отраслевых требований выявляет объективную необходимость перехода к многоуровневой зрелости систем менеджмента. Организациям предлагается последовательно внедрять дополнительные нормативы, охватывающие перспективное планирование качества, анализ уязвимостей и стандартизацию процессов изготовления, что позволяет гармонично продвигаться от базового уровня к моделям, интегрирующим проектный и процессный подходы [1].

При этом традиционные подходы к оценке точности технологических процессов, основанные исключительно на попадании в поле допуска, часто не обеспечивают требуемых показателей конкурентоспособности [3]. Концептуальным положением современного управления качеством становится опережающее планирование вероятности появления несоответствий от всех идентифицированных причин и достижение приемлемого риска, оптимизированного по критерию «затраты–эффективность» на протяжении всего жизненного цикла [7]. Таким образом, формальное соответствие базовым

стандартам выступает лишь стартовым условием, в то время как реальная конкурентоспособность формируется за счет интеграции прогнозной аналитики, цифровизации процессов и рискориентированного проектно-процессного управления [6].

Традиционные модели обеспечения качества, опирающиеся преимущественно на реактивный контроль и формальную корректировку уже возникших несоответствий, в современных условиях теряют самостоятельную эффективность. Эволюция парадигм надёжности и качества прослеживается через последовательный переход от статистического управления к моделям на основе физики отказов, далее – к прогнозной аналитике и, наконец, к управлению устойчивостью систем в условиях глубокой неопределённости [2].

Если в прошлых парадигмах фокус был направлен на макростатистику отказов или выявление физических механизмов деградации, то современная инженерная парадигма требует проактивного управления вариациями и адаптивного контроля неопределённости на всех этапах жизненного цикла изделия [2]. В машиностроении и металлургии это реализуется через рискориентированный подход.

Организация должна не просто документировать брак, но и применять методы оценки рисков (например, FMEA) для анализа уязвимостей до начала переделки или модификации продукции. Такой подход переносит точку приложения усилий на стадии концептуального проектирования и инженерного моделирования, где планирование качества и анализ видов и последствий отказов позволяют количественно оценить вероятность возникновения отклонений, тяжесть последствий и возможность их раннего обнаружения. При этом управление процессными вариациями перестает быть самоцелью: акцент смещается на достижение оптимального уровня вариаций, экономически и технологически обоснованного для конкретного продукта и рыночного сегмента [1].

Таблица 1

Трансформация подходов к управлению качеством

Характеристика	Традиционная (реактивная) парадигма	Современная (рискориентированная) парадигма
Основной фокус	Обнаружение отклонений после их возникновения (постфактум)	Упреждающее управление вариациями и неопределённостями
Инструментарий	Документирование, формальные корректирующие действия (CAPA), классические стандарты	PHM-системы, цифровые двойники, алгоритмы машинного обучения
Отношение к риску	Попытка полного исключения (или допущение «допустимого брака»)	Оптимизация риска («затраты–эффективность»), культура приемлемого риска
Роль персонала	Исполнитель регламентов и процедур	Аналитик данных, менеджер рисков, использующий прогнозные модели
Целевая метрика	Соответствие стандартам по системам менеджмента	Долгосрочная эффективность, минимизация потерь, UQ → UC

Переход от реактивного аудита документации к прогнозной аналитике данных определяет новый стандарт конкурентоспособности. В условиях непрерывных производственных циклов стоимость минуты простоя или выпуска некондиционной партии исчисляется значительными экономическими потерями, что делает классическую модель «выявление–анализ–исправление» неэффективной. На смену ей приходят данные-ориентированные подходы в прогнозировании и управлении состоянием Prognostics and health management (PHM), которые позволяют на основе машинного обучения и статистического управления процессов выявлять скрытые закономерности деградации оборудования и прогнозирования остаточного ресурса. Алгоритмы временных рядов и рекуррентные нейронные сети используются для сопоставления телеметрических параметров с историческими паттернами отказов, что обеспечивает возможность корректировать технологические режимы до материализации дефекта [2].

Использование гибридных алгоритмов, таких как объединение методов FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process – нечеткий метод анализа иерархий) и энтропии (Шеннона), позволяет модели захватывать экспертные знания инженерной команды (субъективный фактор) и одновременно проводить их перекрестную проверку с содержанием статистической информации данных (объективный фактор) [8,10].

Несмотря на масштабную автоматизацию и внедрение интеллектуальных систем, базовым элементом любой СМК остаётся персонал. Рискориентированная парадигма требует от сотрудников не слепого следования инструкциям, а способности предвидеть отклонения, анализировать риски и инициировать корректирующие действия без ожидания прямых управленческих предписаний [1]. Для этого необходимо формировать культуру приемлемого риска, в которой ошибка рассматривается не как повод для санкционирования, а как источник данных для непрерывного улучшения процессов [2].

Эффективность такой культуры напрямую зависит от системы мотивации, компетенций и условий труда. Организации, внедряющие многоуровневые системы менеджмента, демонстрируют, что снижение энтропии процессов, рост вовлечённости персонала и прозрачная обратная связь создают синергетический эффект, усиливающий общую устойчивость системы [1]. Цифровизация и прогнозная аналитика не заменяют человеческий фактор, а трансформируют его роль: от исполнителя регламентов к аналитизу данных и менеджеру рисков, способному оперировать «цифровыми двойниками» процессов для тестирования решений до их внедрения в реальный цикл [2].

Для систем, критичных с точки зрения безопасности, необходима логика «сначала безопасность». Применение некомпенсаторных методов (например, нечеткого ELECTRE III – метод многокритериального принятия решений из семейства методов перевеса) гарантирует, что режимы отказа с высоким уровнем риска не будут математически маскироваться благоприятными оценками в других категориях [8, 9].

Таблица 2

Методологическая матрица оценки рисков

Этап зрелости СМК	Применяемый метод	Ключевая особенность и ограничение
Базовый	FMEA (Анализ видов и последствий отказов)	Стандартный подход для этапа проектирования. Ограничение: часто используется ретроспективно или формально
Продвинутый	Гибридные алгоритмы (AHP + Энтропия)	Синтез экспертных знаний (субъективный вес) и статистических данных (объективный вес). Исключает ограниченность оценок.
Высокий (Критичный)	Нечеткий ELECTRE III	Применяется для систем безопасности. Невозможность «компенсации» высокого риска отказов хорошими оценками по другим критериям.

Проведенный анализ эволюции систем менеджмента качества в машиностроении и металлургии подтверждает, что традиционные модели, ограниченные базовыми требованиями к формализации процессов и документированию, в современных условиях утрачивают самостоятельную значимость для обеспечения устойчивой конкурентоспособности.

Наличие сертифицированной системы менеджмента качества выступает необходимым пороговым условием рыночного допуска, однако не гарантирует технологического лидерства или экономической эффективности предприятий в условиях высокой неопределённости производственных цепей и технологических бифуркаций. Реальные конкурентные преимущества формируются за счёт перехода к рискориентированному проектному подходу, который интегрирует прогнозную аналитику, технологии цифровых двойников и принципы управления состоянием (PHM). Эффективная реализация данной парадигмы требует трансформации роли персонала: от исполнителя регламентов к аналитикам данных и менеджерам рисков, способным осуществлять непрерывный мониторинг и корректировку режимов в реальном времени. Именно такой комплексный подход позволяет предприятиям переходить от локального предотвращения дефектов при проектировании к проактивному управлению процессами на протяжении всего жизненного цикла продукции.

Переход от аудита документации к прогнозной аналитике и цифровой верификации данных представляет собой объективную необходимость для адаптации систем менеджмента к динамичным требованиям заказчиков и внешним шокам. Архитектура будущего качества строится не на парадигме пассивного количественного анализа неопределённостей, а на активной стратегии управления поведением систем в рамках заданной безопасной эксплуатационной оболочки. Эффективная реализация данной модели требует синхронного развития технологической инфраструктуры, внедрения гибридных методов прогнозирования и формирования корпоративной культуры, ориентированной на непрерывное совершенствование и проактивное управление рисками. Только организации, способные синтезировать стати-

стические методы управления процессами, компетенции персонала и цифровые двойники в единую адаптивную среду, смогут обеспечить долгосрочное технологическое лидерство на высокотехнологичных рынках.

Научный доклад выполнен в рамках научной темы FFGU-2024-0024.

Список литературы

1. СТБ 16949-2023 Системы менеджмента организации. Особые требования по применению СТБ ISO 9001 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного, электротранспортного и специального машиностроения.

2. Zeng, Z.; Lin, C.; Peng, W.; Xu, M. The Evolving Paradigm of Reliability Engineering for Complex Systems: A Review from an Uncertainty Control Perspective. Aerospace 2026, *13*, 183. URL: https://doi.org/10.3390/aerospace13020183 (дата обращения 08.05.2026).

3. Панов А. Н. Обеспечение надежности процессов изготовления компонентов транспортных средств // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2008. №2.

4. Панов А. Н. Приемлемые риски функционирования сложных социотехнических систем (в авторской редакции) // «Стандарты и качество» Август 2014.

5. Осмола И.И., Панов А.Н., Шкадрецов И.В., Бурак А.А. Менеджмент качества для организаций наукоемкой и высоко технологичной отрасли экономики // «Стандарты и качество» Август 2010.

6. Ехилевский С. Г., Панов А. Н., Осмола И. И., Шкадрецов И. В. Комплексная система управления охраной труда, промышленной санитарией, безопасностью окружающей среды, качеством, рисками в организации и процессы ее адаптации // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. 2010.

7. Панов А. Н., Осмола И. И., Шкадрецов И. В. Обеспечение показателей качества, охраны труда и экологической безопасности в процессах изготовления машин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2009. №2.

8. Aghazadeh Ardebili A, Sadeghpour Roshany A, Pourmadadkar M, Ghodsi M, Padoano E and Boscolo M (2026) Enhancing risk-based engineering design: a hybrid fuzzy failure analysis with empirical validation. Front. Mech. Eng. 11:1732819. doi: 10.3389/fmech.2025.1732819.

9. B. Roy. ELECTRE III : Electre III: Un algorithme de classements fonde sur une représentation floue des preferences en presence de critères multiples. Cahiers du Centre d'Études de Recherche Opérationnelle, 20, 3–24, 1978.

10. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Мешкова А.Е.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
arinameshkova2002@yandex.ru
Левина Т.А.
к.э.н., заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
t.a.levina@mospolytech.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ЕДИНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ РИСКОРИЕНТИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ УЧАСТИЯ В ПРОВЕРКАХ КВАЛИФИКАЦИИ И МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧИТЕЛЬНЫХ (СРАВНИТЕЛЬНЫХ) ИСПЫТАНИЯХ

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения достоверности результатов деятельности испытательных лабораторий, аккредитованных в национальной системе аккредитации и осуществляющих оценку соответствия единичных транспортных средств требованиям технического регламента Таможенного союза «О безопасности колёсных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011). С 1 января 2026 года вступила в силу актуализированная редакция документа СМ № 03.1-1.0008 «Политика Росаккредитации в отношении участия лабораторий в проверках квалификации и в межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаниях, отличных от проверок квалификации» (версия 04.1, декабрь 2025), которая вводит применение рискориентированного подхода участия ИЛ в ПК и (или) МСИ. В статье выполнен анализ текущего состояния рынка услуг по оценке соответствия единичных транспортных средств, выявлены системные проблемы, препятствующие эффективному участию лабораторий в процедурах внешнего контроля достоверности. Предложен алгоритм идентификации областей технической компетентности испытательной лаборатории. Выполнена количественная оценка экономической эффективности предложенных решений.

Ключевые слова: испытательная лаборатория (ИЛ); проверки квалификации (ПК); межлабораторные сличительные (сравнительные) испытания (МСИ); единичное транспортное средство (ЕТС); свидетельство о безопасности конструкции транспортного средства (СБКТС).

Meshkova A.E.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
arinameshkova2002@yandex.ru
Levina T.A.
Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
t.a.levina@mospolytech.ru

ENSURING THE RELIABILITY OF TEST RESULTS IN CONFORMITY ASSESSMENT OF INDIVIDUAL VEHICLES BASED ON RISK-ORIENTED PLANNING OF PARTICIPATION IN PROFICIENCY TESTING AND INTERLABORATORY COMPARISON (COMPARATIVE) TESTS

Abstract. The article addresses the problem of ensuring the reliability of the results produced by testing laboratories accredited within the national accreditation system that perform conformity assessment of individual vehicles against the requirements of the Customs Union technical regulation «On the Safety of Wheeled Vehicles» (TR CU 018/2011). On 1 January 2026 an updated version of document SM No. 03.1-1.0008 «Rosaccreditation Policy on Laboratory Participation in Proficiency Testing and in Interlaboratory Comparison (Comparative) Tests Other Than Proficiency Testing» (version 04.1, December 2025) entered into force, introducing a risk-oriented approach to testing laboratories' participation in proficiency testing (PT) and/or interlaboratory comparisons (ILC). The article analyzes the current state of the market for conformity assessment services for individual vehicles and identifies systemic problems that hinder laboratories' effective participation in external reliability control procedures. An algorithm for identifying a testing laboratory's areas of technical competence is proposed. A quantitative assessment of the economic efficiency of the proposed solutions is performed.

Keywords: testing laboratory (TL); proficiency testing (PT); interlaboratory comparison (comparative) tests (ILC); individual vehicle (IV); vehicle design safety certificate (VDSC).

Обеспечение безопасности дорожного движения является одной из приоритетных задач государственной политики Российской Федерации в сфере технического регулирования. Ключевым элементом системы безопасности выступает процедура подтверждения соответствия единичных транспортных средств (ЕТС), ввозимых физическими лицами на территорию Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Документом, удостоверяющим такое соответствие, служит свидетельство о безопасности конструкции транспортного средства (СБКТС), которое выдаётся испытательными лабораториями (ИЛ), аккредитованными в национальной системе аккредитации.

Анализ статистических данных, опубликованных в реестре СБКТС, свидетельствует о неуклонном росте количества оформляемых свидетельств. В 2025 году было выдано более 580 тысяч СБКТС, что в несколько раз превышает показатели 2024 года. Увеличение объёмов работ в сочетании с высокой социальной значимостью результатов испытаний предъявляет повышенные требования к достоверности проводимых процедур технической экспертизы и инструментальных измерений.

В соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» [2], каждая аккредитованная ИЛ обязана внедрить систему мониторинга достоверности получаемых результатов. Ключевым элементом такой системы является участие в проверках квалификации (ПК) и межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаниях (МСИ). Данные процедуры позволяют получить независимую

оценку компетентности лаборатории и подтвердить корректность применяемых методов.

С 1 января 2026 года введена в действие актуализированная редакция документа СМ № 03.1-1.0008 «Политика Росаккредитации в отношении участия лабораторий и органов инспекции в проверках квалификации и в межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаниях, отличных от проверок квалификации» (версия 04.1, декабрь 2025) [6]. Новый документ существенно изменяет подходы к организации данной деятельности. В частности, от лабораторий требуется:

- применение рискориентированного подхода при планировании участия в ПК и МСИ;
- самостоятельное определение областей технической компетентности;
- обоснованный выбор провайдеров проверок квалификации;
- установление уровня и периодичности участия с учётом идентифицированных рисков;
- документирование всех принятых решений для последующей демонстрации экспертной группе.

Цель настоящего исследования заключается в разработке научно обоснованной и реализуемой процедуры участия, аккредитованной ИЛ в ПК и МСИ, учитывающей требования актуализированной политики Росаккредитации и позволяющей минимизировать риски, связанные с возможным приостановлением действия аккредитации.

По состоянию на первый квартал 2026 года в реестре аккредитованных лиц Федеральной службы по аккредитации содержится информация о 72 ИЛ, имеющих право проводить оценку соответствия единичных ТС. Территориальное распределение лабораторий неравномерно: большинство из них расположено в приграничных регионах, зонах таможенного контроля и крупных транспортных узлах. Анализ количественных показателей оформления СБКТС за 2025 год позволил выделить группу лабораторий «флагманов» – 27 организаций, оформивших в совокупности 472 148 свидетельств, что составляет 81,2% от общего количества. Средняя выработка на одну лабораторию – «флагман» достигла 17 500 СБКТС в год.

Проведённый анализ позволил систематизировать основные проблемы, препятствующие эффективному участию ИЛ в ПК и (или) МСИ. Результаты систематизации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Системные проблемы участия ИЛ в ПК и МСИ

Проблемная область	Характеристика проблемы	Возможные последствия
Неделимость объекта испытаний	ЕТС не может быть разделено на части и распределено между участниками ПК и (или) МСИ	Усложнение организации сличений, необходимость транспортировки ТС между лабораториями
Ограниченное число провайдеров	В реестре аккредитованных лиц содержится информация только о трёх провайдерах ПК в области испытаний ТС - ООО «НП МСИ» (номер записи в РАЛ RA.RU.430295) - ООО «Электронтест» (номер записи в РАЛ RA.RU.430299) - ООО «Коллоквиум» (номер записи в РАЛ RA.RU.430305)	Дефицит доступных программ ПК, отсутствие конкуренции
Низкая осведомлённость персонала	Отсутствие у работников лабораторий системных знаний о процедурах мониторинга достоверности и требованиях новой политики Росаккредитации	Риски неправильного планирования и, как следствие, выявление несоответствий при проверках

В соответствии с требованиями документа [6], на первом этапе ИЛ необходимо сформировать области своей технической компетентности. Для этого проводится оценка следующих сведений, указанных в области аккредитации:

- методы технической экспертизы и испытаний;
- объекты испытаний;
- определяемые характеристики (показатели).

Для определения уровня и периодичности участия в ПК и (или) МСИ ИЛ учитывает область аккредитации. При определении области технической компетенции, сначала рассматриваются методы испытаний (измерений), и через характеристики переходит к объектам.

Область технической компетенции может содержать более одного метода испытаний (измерений) или измерений, характеристики и объекта до тех пор, пока может быть продемонстрирована равнозначность и сопоставимость показателей.

Объединение нескольких методов в одну область технической компетенции происходит с учетом данных о верификации метода.

Уровень и периодичность участия в ПК и (или) МСИ определяется после установления областей технической компетенции с учетом анализа рисков и возможностей, рассмотрев следующие положения:

– наличие провайдеров ПК и необходимых программ;

– количество и периодичность проведенных испытаний (измерений)/ технической экспертизы за предыдущий год;

– динамику изменения состава работников;

– опыт и знания работников;

– расположенность/удаленность мест осуществления деятельности лабораторий;

– проведение внутрилабораторного контроля;

– ранее полученных результатов участив в ПК и/или МСИ;

– планируемых расширений области аккредитации, внедрении методов.

ИЛ участвует в ПК и (или) МСИ не реже одного раза в год в соответствии с годовым Планом с учетом установленных уровня и периодичности для каждой области технической компетенции.

На основе анализа приложений А и Б ГОСТ 33670-2015 [1] выделено 32 области технической компетентности для ИЛ, осуществляющих оценку соответствия ЕТС. (Например, визуальный контроль, измерение давления, измерение массы, измерение с использованием шумомера, измерение усилия, измерения контролируемых показателей на прогретом двигателе (содержание СО), испытания на тормозном стенде, проверка с использованием прибора для регулировки фар, проверка с помощью прибора для проверки светопропускания стекол, определение частоты следования проблесков).

На основе анализа требований документа [3, 6] и с учётом выявленных проблем разработан алгоритм участия ИЛ в ПК и (или) МСИ. Алгоритм представлен на рисунке 1.

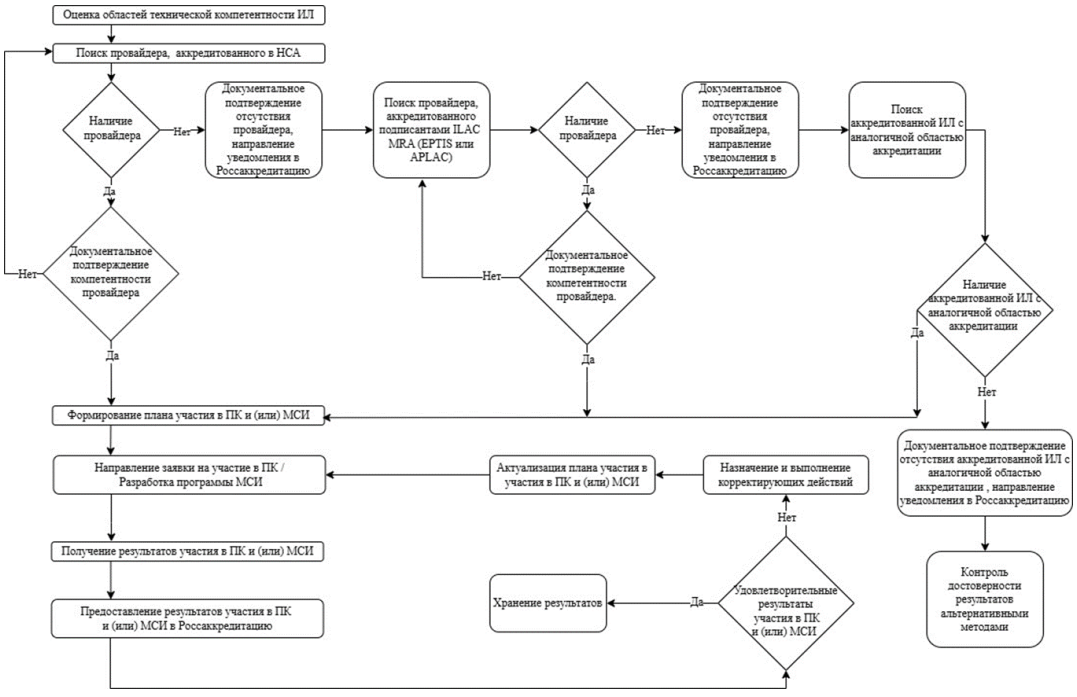


Рис. 1. Алгоритм участия испытательной лаборатории в проверках квалификации и межлабораторных сличительных испытаниях

Результаты технической экспертизы и испытаний ЕТС оцениваются по разбросу полученных участниками ПК и (или) МСИ результатов с учетом

возможных источников ошибок (например, нестабильность показателя объекта испытаний во времени или значимая зависимость от человеческого фактора).

Качественные результаты технической экспертизы, полученные в условиях воспроизводимости, признают удовлетворительными, если полученные результаты совпадают (идентичны).

Количественные результаты испытаний, полученные в условиях воспроизводимости, признают удовлетворительными, если результат контрольной процедуры не превышает установленный норматив контроля.

Результат контрольной процедуры (RК) количественных результатов испытаний, полученных в условиях воспоризводимости, рассчитывают по формуле:

$$RК = |X1 - X2|, \quad (1)$$

где X1, X2 – результаты испытаний, полученные участниками ПК и (или) МСИ.

В качестве норматива контроля используют воспроизводимость (R), которую рассчитывают по формуле:

$$R = Q(P, n) \cdot \sigma R, \quad (2)$$

где Q (P, n) – коэффициент, зависящий от количества участников ПК и (или) МСИ n и доверительной вероятности P (см. таблицу 2);

σR – среднеквадратическое отклонение результатов испытаний, полученных в условиях воспроизводимости.

Таблица 2

Коэффициент, зависящий от количества участников ПК и (или) МСИ n и доверительной вероятности P

n	Q для P = 0,95
2	2,77
3	3,31

Среднеквадратическое отклонение воспроизводимости (σR) рассчитывают по формуле:

$$\sigma R = U(\Delta)/Z, \quad (3)$$

где U(Δ) – неопределенность (погрешность) результатов испытаний;

Z – квантиль распределения, зависящий от его типа и принятой доверительной вероятности P. Для доверительной вероятности P=0,95 Z=1,96.

Неопределенность (погрешность) результатов испытаний U(Δ) рассчитывают по неопределенности (погрешности) средств измерений, применяемых участниками ПК и (или) МСИ, по формуле:

$$U(\Delta) = \sqrt{(U(\Delta)_{си1}^2 + (\Delta)_{си2}^2)} \quad (4)$$

Результат контрольной процедуры (RК) сравнивают с нормативом контроля (R). Если выполняется условие:

$$|RК| \leq R, \quad (5)$$

то воспроизводимость результатов испытаний признают удовлетворительной.

Удовлетворительная воспроизводимость результатов технической экспертизы и испытаний служит основанием для признания результатов ПК и (или) МСИ удовлетворительными. При неудовлетворительной воспроизводимости результатов, результаты ПК и (или) МСИ признают неудовлетворительными.

Для количественной оценки эффективности разработки процедуры обеспечения достоверности результатов использован метод расчёта индикатора экономии от предупредительных мер, который вычисляется по формуле:

$$И = ПУ / Р, \quad (6)$$

где ПУ – предотвратимые убытки (руб.); Р – защитные расходы (руб.).

Защитные расходы включают затраты на разработку документированной процедуры, её внедрение и участие в ПК и (или) МСИ. Расчёт произведён для лаборатории «флагмана» со следующими параметрами:

- стоимость оформления одного СБКТС – 30 000 руб.;
- количество оформляемых СБКТС в день – 19 ед.;
- период приостановления аккредитации – 60 рабочих дней.

Результаты расчёта сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Экономические показатели внедрения процедуры в деятельность ИЛ

Показатель	Значение, руб.
Защитные расходы (разработка + внедрение + участие в ПК и (или) МСИ)	1 654 702
Финансовые потери за период приостановления аккредитации (60 дней)	32 734 566
Расходы на восстановление (разработка, внедрение и участие в сжатые сроки)	2 538 347
Предотвратимые убытки (финансовые потери + расходы на восстановление)	35 272 913
Индикатор экономии от предупредительных мер	21,3

Полученное значение индикатора (21,3) означает, что каждый рубль, инвестированный в разработку и внедрение процедуры, позволяет предотвратить убытки в размере 21,3 рубля. Столь высокий показатель объясняется значительным объёмом ежедневной выручки лаборатории – «флагмана» и существенными потерями при остановке деятельности.

На рисунке 2 представлена диаграмма, иллюстрирующая соотношение защитных расходов и предотвратимых убытков: левый столбец – защитные расходы (1,65 млн руб.), правый столбец – предотвратимые убытки (35,27 млн руб.).

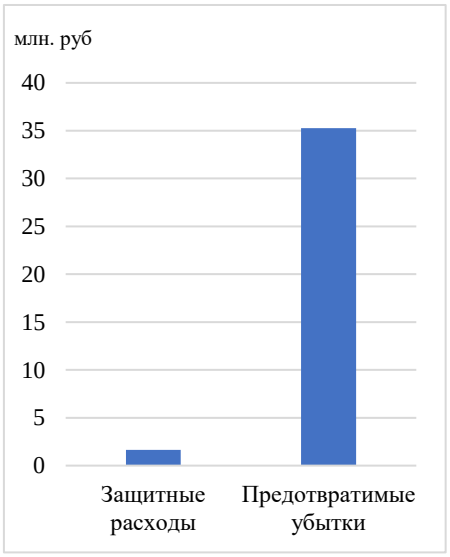


Рис. 2. Соотношение защитных расходов и предотвратимых убытков при внедрении документированной процедуры

В результате проведённого исследования научно обосновано внедрение в деятельность ИЛ процедуры участия аккредитованной испытательной лаборатории в проверках квалификации и межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаниях, учитывающая требования актуализированной политики Росаккредитации (версия 04.1, декабрь 2025) и специфику деятельности по оценке соответствия единичных транспортных средств.

Список литературы

1. ГОСТ 33670-2015 «Автомобильные транспортные средства единичные. Методы экспертизы и испытаний для проведения оценки соответствия» // Кодекс [Справочная правовая система]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200136417 (дата обращения: 06.04.2026).

2. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» // Кодекс [Справочная правовая система]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200166732 (дата обращения: 06.04.2026).

3. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации» // Кодекс [Справочная правовая система]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200108187 (дата обращения: 06.04.2026).

4. Официальный сайт Федеральной службы по аккредитации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет». – URL: https://fsa.gov.ru/ (дата обращения: 06.04.2026)

5. Приказ Минэкономразвития России от 26 октября 2020 года № 707 «Об утверждении критериев аккредитации и перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации» // Кодекс [Справочная правовая система]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/566305944 (дата обращения: 06.04.2026).

6. СМ № 03.1-1.0008. Политика Росаккредитации в отношении участия лабораторий и органов инспекции в проверках квалификации и в межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаниях, отличных от проверок квалификации. Версия 04.1, декабрь 2025 // Кодекс [Справочная правовая система]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1314648915 (дата обращения: 06.04.2026).
7. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колёсных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011) // КонсультантПлюс [Справочная правовая система]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125114/ (дата обращения: 06.04.2026).
8. Федеральный закон от 28 декабря 2013 года № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» // Кодекс [Справочная правовая система]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/499067411 (дата обращения: 06.04.2026).
9. Чигвинцева К.А. О некоторых вопросах обеспечения достоверности при проведении оценки безопасности конструкции транспортных средств // Альманах Крым. Экономика, инновации. – 2024. – № 46. – С. 230–239.

Силенко А.Н.
к. т. н., доцент кафедры управления бизнес-проектами (№ 72)
НИЯУ МИФИ
Россия, Москва
silko@mail.ru
Дударев С.А.
студент
НИЯУ МИФИ
Россия, Москва
dudarev_91@internet.ru

ПОВЫШЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМУ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и прикладные аспекты повышения результативности процессов снабжения металлургического предприятия на основе интеграции технологий искусственного интеллекта в систему менеджмента качества. Обоснована актуальность цифровой трансформации закупочной деятельности в условиях нестабильности внешней среды, усложнения логистических цепей, роста требований к качеству продукции и необходимости повышения устойчивости производственных систем. Проведен анализ современных подходов к управлению снабжением в рамках процессного и рискориентированного подходов, а также выявлены ограничения традиционных методов, основанных на экспертных оценках и ретроспективных данных. Рассматриваются ключевые направления применения технологий искусственного интеллекта, включая прогнозирование потребности в материально-технических ресурсах, автоматизацию закупочных процедур, интеллектуальную оценку поставщиков и мониторинг исполнения контрактов в режиме реального времени. Особое внимание уделено вопросам интеграции цифровых инструментов в систему менеджмента качества и их роли в обеспечении принципов непрерывного улучшения, прозрачности и управляемости процессов. На основе анализа отраслевой практики и кейса ПАО «НЛМК» показано, что внедрение интеллектуальных решений способствует снижению операционных издержек, сокращению

длительности закупочного цикла, повышению надежности поставок и улучшению качества принимаемых управленческих решений, что в целом обеспечивает рост эффективности функционирования предприятия.

Ключевые слова: система менеджмента качества; искусственный интеллект; процессы снабжения; металлургическое предприятие; цифровизация закупок; управление поставщиками.

Silenko A.N.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Business Project Management (No. 72)
Systems Management NRNU MEPhI
Russia, Moscow
silko@mail.ru
Dudarev S.A.
Student
NRNU MEPhI
Russia, Moscow
dudarev_91@internet.ru

IMPROVING THE EFFICIENCY OF METALLURGICAL ENTERPRISE SUPPLY PROCESSES BASED ON THE INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES INTO THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

Abstract. The article discusses the theoretical and applied aspects of improving the efficiency of supply processes of a metallurgical enterprise based on the integration of artificial intelligence technologies into the quality management system. The relevance of the digital transformation of procurement activities in conditions of instability of the external environment, increasing complexity of logistics chains, increasing requirements for product quality and the need to increase the stability of production systems is substantiated. The analysis of modern approaches to supply management within the framework of process-based and risk-based approaches has been carried out, and the limitations of traditional methods based on expert assessments and retrospective data have been identified. The key areas of application of artificial intelligence technologies are considered, including forecasting the need for material and technical resources, automation of procurement procedures, intelligent evaluation of suppliers and monitoring the execution of contracts in real time. Special attention is paid to the integration of digital tools into the quality management system and their role in ensuring the principles of continuous improvement, transparency and manageability of processes. Based on the analysis of NLMK's industry practice and case study, it is shown that the introduction of intelligent solutions helps reduce transaction costs, shorten the duration of the procurement cycle, increase supply reliability and improve the quality of management decisions, which generally increases the efficiency of the enterprise.

Keywords: quality management system; artificial intelligence; supply processes; metallurgical enterprise; digitalization of procurement; supplier management.

В современных условиях развития промышленности металлургические предприятия функционируют в среде высокой неопределенности, обусловленной нестабильностью рынков сырья, усложнением логистических цепей

и ростом требований к качеству продукции. В этих условиях процессы снабжения приобретают стратегическое значение, оказывая непосредственное влияние на непрерывность производства и уровень издержек [1].

Традиционные подходы к управлению снабжением, основанные на нормативных методах и экспертных оценках, характеризуются ограниченной адаптивностью и недостаточной точностью в условиях динамично изменяющейся внешней среды. В связи с этим возрастает значимость внедрения технологий искусственного интеллекта, позволяющих обрабатывать большие массивы данных и формировать обоснованные управленческие решения.

Система менеджмента качества рассматривает снабжение как совокупность взаимосвязанных процессов, направленных на обеспечение предприятия ресурсами заданного качества, в необходимом объеме и в установленные сроки. В рамках процессного подхода закупочная деятельность включает этапы планирования потребности, выбора поставщиков, заключения контрактов и контроля исполнения обязательств [2].

Результативность процессов снабжения определяется степенью достижения установленных целей, включая соблюдение сроков поставок, соответствие качества продукции требованиям и оптимизацию затрат. Существенную роль играет рискориентированное мышление, направленное на предупреждение возможных сбоев в цепях поставок.

В условиях цифровой трансформации традиционные инструменты управления качеством дополняются аналитическими и интеллектуальными системами, обеспечивающими более высокий уровень управляемости процессов.

Использование технологий искусственного интеллекта позволяет перейти от реактивной модели управления снабжением к проактивной, основанной на прогнозировании и анализе данных. Алгоритмы машинного обучения обеспечивают возможность учета широкого спектра факторов, включая производственные планы, рыночную конъюнктуру и исторические данные [2].

Применение интеллектуальных систем способствует повышению точности прогнозирования потребности в ресурсах, оптимизации уровня запасов и снижению вероятности возникновения дефицита или избыточных складских остатков. Кроме того, использование аналитических моделей позволяет осуществлять комплексную оценку поставщиков с учетом множества критериев, включая качество продукции, соблюдение сроков поставок и надежность выполнения контрактных обязательств [4].

Таким образом, искусственный интеллект выступает инструментом повышения обоснованности управленческих решений и снижения операционных рисков.

Интеграция технологий искусственного интеллекта в систему менеджмента качества предполагает их включение в процессную архитектуру предприятия. На этапе планирования осуществляется прогнозирование потребности в ресурсах, на этапе обеспечения – выбор поставщиков, на этапе контроля – мониторинг показателей, а на этапе улучшения – анализ отклонений и реализация корректирующих мероприятий.

Использование интеллектуальных систем способствует реализации принципов непрерывного совершенствования, принятия решений на основе данных и повышения прозрачности процессов. При этом важным условием эффективности является обеспечение качества исходной информации и развитие компетенций персонала [5].

Анализ практики внедрения технологий искусственного интеллекта в металлургической отрасли свидетельствует о значительном улучшении ключевых показателей деятельности. Применение методов машинного обучения и компьютерного зрения позволяет повысить точность выявления дефектов продукции более чем на 30%, а использование предиктивной аналитики способствует оптимизации расхода сырья и снижению простоев оборудования [6].

Подтверждением эффективности интеграции технологий искусственного интеллекта в систему менеджмента качества является опыт ПАО «НЛМК», реализующего цифровую трансформацию процессов снабжения [7].

На предприятии внедрены инструменты интеллектуальной аналитики, поддерживающие выбор поставщиков и управление контрактами с учетом комплексных критериев, включая качество, надежность и соблюдение сроков поставок. Автоматизация закупочных процедур позволила оптимизировать согласование заявок, формирование заказов и контроль их исполнения, сократив длительность операционного цикла и снизив влияние человеческого фактора.

Внедрение цифровых решений обеспечило повышение прозрачности и управляемости процессов снабжения, а также своевременное выявление отклонений в рамках принципов системы менеджмента качества. Развитие цифрового взаимодействия с поставщиками способствовало расширению конкурентной среды и повышению качества закупаемой продукции.

Таблица

Количественные эффекты внедрения ИИ и цифровых технологий в системе менеджмента качества ПАО «НЛМК»

Направление внедрения	Содержание решения	Элемент СМК	Количественный результат
Автоматизация закупочных процедур (RPA)	Роботизация проведения тендеров и конкурсных процедур	Управление операциями	До 4 000 процедур в год автоматически; экономия до 3 000 человеко-часов в год
Цифровая платформа закупок (SAP Ariba)	Интеллектуальное управление закупками оборудования и поставщиками	Управление поставщиками	Снижение операционных затрат на 20–40%
Оптимизация сроков закупок	Автоматизация инвестиционных закупок (CapEx)	Процессный подход	Сокращение сроков закупки на 10–20%
Электронные закупочные процедуры	Переход на цифровые платформы закупок	Прозрачность процессов	Более 90% закупочных процедур в электронном виде
Масштаб закупочной деятельности	Интеграция данных и поставщиков	Планирование и обеспечение	Объем закупок 239 млрд руб.; более 14 тыс. поставщиков
Локализация и устойчивость цепей поставок	Работа с локальными поставщиками	Управление рисками	87% закупок у локальных поставщиков

Таким образом, данный опыт подтверждает, что применение технологий искусственного интеллекта обеспечивает системное повышение результативности снабжения [7].

Сопоставление традиционного и цифрового подходов к управлению снабжением позволяет выявить качественные различия в уровне результативности. Традиционная модель характеризуется использованием экспертных оценок и реактивным управлением, тогда как применение технологий искусственного интеллекта обеспечивает переход к прогнозному и адаптивному управлению.

Повышение скорости обработки информации, снижение влияния человеческого фактора и возможность комплексного анализа данных способствуют улучшению качества управленческих решений и снижению операционных рисков [3].

Результаты исследования подтверждают, что интеграция технологий искусственного интеллекта в систему менеджмента качества является эффективным инструментом повышения результативности процессов снабжения металлургического предприятия. Применение интеллектуальных решений позволяет повысить точность планирования, снизить уровень рисков и обеспечить устойчивость цепей поставок.

В условиях цифровой трансформации промышленности использование технологий искусственного интеллекта становится необходимым элементом развития системы управления качеством и повышения конкурентоспособности металлургических предприятий.

Список литературы

1. До трех авторов включительно:
2. Иванов Д. А. Управление цепями поставок, 2020. 56 с.
3. Мещеряков Р. В., Архипов А. А. Применение технологий искусственного интеллекта в промышленности // Вестник МГТУ. – 2022. – №4. – С. 45–52.
4. Абрамов В.И. Цифровая трансформация бизнеса: учебное пособие. – Курск: Университетская книга, 2025. 77 с.
5. Более трех авторов:
6. Тупчиенко В.А., Путилов А.В., Харитонов В.В., Гусева А.И., Киреев В.С., Бочкарёв П.В., Кузнецов И.А., Крянев А.В., Силенко А.Н., Юшков Е.С., Аликова О.П., Ростовский Н.С., Смирнов Д.С. Цифровые платформы управления жизненным циклом комплексных систем – Москва, 2018.
7. Электронный ресурс:
8. Цифровизация промышленности. Текст: электронный// https://www.rbc.ru/industries/news/67fceb649a79472334c831e4 (дата обращения 26.04.2026)
9. Применение ИИ в металлургии. Текст: электронный// https://sber.pro/publication/kak-ai-ispolzuetsya-v-metallurgii-ekonomicheskii-effekt-i-novie-professii/ (дата обращения 26.04.2026)

10. Мероприятии по повышению эффективности. Текст: электронный// ПАО «НЛМК»: офиц. сайт. https://nlmk.com/ru/for-suppliers-and-contractors/?utm_sourcehttps://nlmk.com/ru/ (дата обращения 18.04.2026)

Вербицкая Н.Р.
заместитель генерального директора
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
Россия, Санкт-Петербург
n.r.verbitskaya@vniim.ru

ПОКАЗАТЕЛИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА ПО ISO 30414 КАК ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ АНАЛИЗА СО СТОРОНЫ РУКОВОДСТВА

Аннотация. Устойчивое развитие организации в контексте СМК определяется способностью системы обеспечивать компетентный и вовлеченный персонал как стратегический ресурс. Несмотря на то что ISO 9001 обязывает высшее руководство рассматривать адекватность ресурсов в рамках анализа со стороны руководства (АСР, п. 9.3.2), практика российских организаций свидетельствует о системном отсутствии измеримых показателей состояния персонала в составе входных данных АСР. Принятие DIS ISO 9001:2026, включающего обязательную оценку культуры качества и этики как входных данных АСР, формирует нормативное основание для устранения данного пробела. Настоящая статья разрабатывает методический подход к обеспечению стандартных показателей человеческого капитала в системе ISO 30414:2025 во входных данных АСР. Предложена матрица нормативного соответствия семи зон ISO 30414:2025 требованиям ISO 9001 (включая редакцию шестую 2026 г.), сформирован перечень базовых показателей с расчетными формулами и целевыми ориентирами, разработан пятиэтапный методический алгоритм по стандартному циклу PDCA и оптимизированный шаблон раздела «Состояние человеческого капитала» в протоколе АСР. Практическое применение методик обеспечивает доказательность управленческих решений о ресурсах в СМК, опережающую готовность к переходу на ISO 9001:2026, и верифицированную доказательную базу для раскрытия S-компонента ESG по стандарту ESRS S1.

Ключевые слова: система менеджмента качества; анализ управления; человеческий капитал; ISO 30414; ISO 9001:2026; организационная устойчивость; показатели результативности персонала; культура качества; раскрытие информации об ESG; HR-аналитика в СМК.

Verbitskaya N.R.
Deputy General Director
D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM)
Russia, Saint Petersburg
n.r.verbitskaya@vniim.ru

ISO 30414 HUMAN CAPITAL METRICS AS MANDATORY INPUTS FOR MANAGEMENT REVIEW

Abstract. The sustainable development of an organisation within a quality management system (QMS) framework is determined by the system's ability to maintain a competent and engaged workforce as a strategic resource. Although ISO 9001 requires top management to address the adequacy of resources within the management review process (MR, Clause 9.3.2), the practice of Russian organisations reveals a systemic absence of measurable workforce indicators among MR inputs. The adoption of DIS ISO 9001:2026 – which introduces mandatory assessment of quality culture and ethical behaviour as MR inputs – establishes a normative basis for closing this gap. This article develops a methodological approach to incorporating standardised human

capital metrics from ISO 30414:2025 into the MR input data structure. A normative alignment matrix mapping seven ISO 30414:2025 domains to the requirements of ISO 9001 (including the sixth edition of 2026) is proposed; a set of baseline indicators with calculation formulae and target benchmarks is defined; a five-stage methodological algorithm following the PDCA cycle is developed; and an optimised template for the «Human Capital Status» section of the MR record is provided. Practical application of the proposed approach ensures evidence-based resource decisions within the QMS, supports proactive readiness for transition to ISO 9001:2026, and provides a verified evidence base for ESG disclosure under the S-component of ESRS S1.

Keywords: quality management system; management review; human capital; ISO 30414; ISO 9001:2026; organisational resilience; workforce performance indicators; quality culture; ESG disclosure; HR analytics in QMS.

Устойчивое развитие организации в современных условиях определяется не только финансовой устойчивостью или технологическим оснащением, но и способностью системы менеджмента качества (СМК) воспроизводить компетентный, вовлеченный персонал как стратегический ресурс. Международный стандарт ISO 9001:2015 [1] закрепляет требования к компетентности и ресурсному обеспечению в разделах 7.1.2 и 7.2, однако не предписывает конкретных метрик для их количественного измерения и управленческой интерпретации. Следствием этого является характерная для практики российских организаций ситуация, при которой данные о состоянии персонала присутствуют в документации СМК в декларативной форме, не трансформируясь в аналитические входные данные для принятия стратегических решений.

Ключевым механизмом такого принятия решений в ISO 9001 является анализ со стороны руководства (АСР, п. 9.3). Стандарт обязывает руководство рассматривать в рамках АСР адекватность ресурсов (п. 9.3.2d), результаты мониторинга и измерений (п. 9.3.2c), а также результативность действий в отношении рисков (п. 9.3.2e). Несмотря на то что персонал является критическим ресурсом, в большинстве организаций человеческий капитал в повестке АСР сводится к формальным сведениям об укомплектованности штата или итогам обучения – без сопоставления с нормативными ориентирами и без анализа тренда.

Данный разрыв приобретает особую актуальность в свете двух взаимосвязанных нормативных тенденций. Во-первых, проектная версия ISO 9001:2026 (DIS, 2025–2026) [2, 12] расширяет входные данные АСР: п. 9.3.2 дополняется обязательной оценкой культуры качества и этики поведения в организации как самостоятельных объектов анализа. Это означает переход от измерения процессных результатов к оценке организационных условий, формирующих эти результаты. Во-вторых, обновленный стандарт ISO 30414:2025 [3] определяет 11 областей измерения человеческого капитала с конкретными показателями, напрямую соответствующими требованиям ISO 9001 к ресурсам, компетентности и культуре. Два стандарта описывают

один и тот же объект управления с разных сторон: ISO 9001 – через требования к СМК, ISO 30414 – через метрики персонала. Это совпадение и делает интеграцию показателей ЧК в АСР нормативно обоснованной.

Существующие исследования, в том числе работы автора настоящей статьи [4,5], посвящены либо разработке моделей экономической оценки человеческого капитала, либо концептуальному обоснованию интеграции HR-аналитики в экономику качества – тогда как вопрос о том, каким образом полученные данные должны быть включены в действующий регламентированный процесс СМК, остается нерешенным.

Цель настоящей статьи – разработать методический подход к включению стандартизированных показателей человеческого капитала (ISO 30414:2025) в систему входных данных анализа со стороны руководства (п. 9.3 ISO 9001), обеспечивающий доказательность управленческих решений в области ресурсного обеспечения СМК и поддерживающий устойчивое развитие организации.

В соответствии с поставленной целью решаются следующие задачи:

- установить нормативное соответствие между областями измерения ISO 30414:2025 и требованиями п. 9.3.2 ISO 9001 (с учетом изменений ISO 9001:2026);

- сформировать перечень показателей человеческого капитала, подлежащих включению в АСР, с формулами расчета и целевыми ориентирами;

- разработать методический алгоритм интеграции данных о человеческом капитале в документацию АСР.

Объект исследования – система менеджмента качества промышленной организации, сертифицированной по ISO 9001. Предмет исследования – методический механизм включения показателей человеческого капитала в процесс анализа со стороны руководства.

Научная новизна работы состоит в формировании обоснованного перечня показателей человеческого капитала, нормативно совместимых одновременно с ISO 30414:2025 и ISO 9001 (в редакции 2015 и 2026 гг.), а также в разработке конкретного методического алгоритма.

Теоретические основания интеграции показателей человеческого капитала в анализ со стороны руководства

Анализ со стороны руководства (АСР) представляет собой установленный ISO 9001 периодический процесс оценки высшим руководством пригодности, адекватности, результативности и согласованности системы менеджмента качества со стратегическим направлением организации (п. 9.3.1). Нормативная логика АСР выстроена по принципу замкнутого управленческого цикла: на входе – агрегированные данные о функционировании СМК, на выходе – конкретные решения и действия, в том числе в отношении ресурсного обеспечения и возможностей для улучшения (п. 9.3.3).

Перечень обязательных входных данных АСР закреплен в п. 9.3.2 ISO 9001:2015 и включает: статус действий предыдущего АСР (п. 9.3.2a); изменения внешних и внутренних факторов (п. 9.3.2b); результативность СМК,

в том числе тенденции по несоответствиям, аудитам, удовлетворенности потребителей, KPI процессов (п. 9.3.2c); адекватность ресурсов (п. 9.3.2d); результативность действий в отношении рисков и возможностей (п. 9.3.2e); возможности для улучшения (п. 9.3.2f). Выходные данные АСР должны включать решения о возможностях улучшения, изменениях в СМК и потребностях в ресурсах (п. 9.3.3).

Практическая реализация АСР в большинстве организаций существенно сужает нормативно установленный охват данных. Как свидетельствуют исследования, блок «адекватность ресурсов» (п. 9.3.2d) трактуется преимущественно как анализ финансовых и инфраструктурных ресурсов; персонал упоминается в части укомплектованности штата или итогов плановых обучений без сопоставления с нормативными ориентирами и без анализа тренда [7,8]. Данные о компетентности, удержании, вовлеченности и культуре качества – характеристиках, непосредственно определяющих результативность СМК, – как правило, в АСР не представлены в измеримом виде.

Стандарт ISO 30414:2025 как нормативная база измерения человеческого капитала

ISO 30414 является первым международным стандартом, устанавливающим унифицированную систему показателей для внутреннего и внешнего раскрытия информации о персонале как стратегическом активе организации. В редакции 2025 года стандарт охватывает 11 областей человеческого капитала с 69 показателями, применимыми к организациям любого размера и отраслевой принадлежности:

- Workforce composition – состав и структура персонала;
- Compliance, ethics and workforce relations – соответствие требованиям, этика, трудовые отношения (11 метрик);
- Leadership, culture and engagement – лидерство, культура, вовлеченность (6 метрик);
- Skills, capabilities and development – компетенции и развитие персонала (6 метрик);
- Diversity – разнообразие персонала;
- Recruitment – подбор персонала;
- Health, safety and well-being – охрана труда и здоровья;
- Workforce turnover – текучесть персонала (4 метрики);
- Costs – затраты на персонал;
- Mobility and succession planning – мобильность и преемственность (9 метрик);
- Productivity – производительность труда (4 метрики).

ISO 30414:2025 переводит кадровую политику из области деклараций в область измеримых данных, пригодных как для управленческих решений, так и для ESG-раскрытия. Стандарт прямо позиционируется как инструмент S-компонента ESG (Social pillar) и в части собственного персонала соответствует требованиям ESRS S1 (European Sustainability Reporting Standards –

S1 «Собственная рабочая сила»). Это делает ISO 30414 инструментом двойного назначения: управленческого и отчётного [6].

4 декабря 2025 года страны – члены ISO официально одобрили Draft International Standard (DIS) ISO 9001:2026; публикация финальной версии ожидается в 2026 году [13]. Настоящая работа ориентирована на требования DIS как уже вступившего в силу ориентира для организаций, осуществляющих опережающую подготовку СМК к переходу.

Авторами установлены ключевые изменения стандарта, непосредственно затрагивающие предмет настоящего исследования:

Пункт 5.1.1 «Лидерство и приверженность»: высшее руководство обязано активно пропагандировать культуру качества и этичное поведение – не только декларировать политику, но и демонстрировать их в конкретных управленческих решениях.

Пункт 7.1.4 «Среда для функционирования процессов»: расширяется от физических условий труда до этических, социальных и психологических факторов, включая недискриминацию, психологическую безопасность и снижение стресса.[13]

Пункт 7.3 «Осведомленность»: требования к осведомленности персонала дополняются пониманием культуры качества и ожиданий в области этики.[14][13]

Пункт 4.1 «Понимание организации и ее контекста»: климатические и экологические факторы формально включены в перечень внешних факторов контекста.

Перечисленные изменения формируют прямое нормативное основание для включения в АСР показателей, измеряющих культуру качества, этику и вовлеченность персонала. Именно эти характеристики охватываются областью ISO 30414 «Leadership, culture and engagement» (6 метрик) и областью «Compliance, ethics and workforce relations» (11 метрик). Следовательно, интеграция отдельных показателей ISO 30414 в систему входных данных АСР не является опциональным расширением, но становится методическим ответом на обязательные требования ISO 9001:2026.

Отбор показателей не может быть произвольным: каждый включаемый в АСР показатель должен иметь однозначное нормативное основание в тексте ISO 9001. Именно поэтому первым шагом является установление соответствия между областями ISO 30414:2025 и конкретными пунктами стандарта.

Аналитическая задача формулируется следующим образом: из 11 областей и 69 показателей ISO 30414:2025 необходимо выделить те, которые (а) удовлетворяют требованиям п. 9.3.2 ISO 9001 как входные данные АСР; (б) соответствуют измененным требованиям ISO 9001:2026 (культура, этика, ресурсы); (в) применимы в организациях без развитой HR-аналитической инфраструктуры; (г) пригодны для включения в ESG S-раскрытие по ESRS S1. Формирование такой матрицы соответствия и отбор приоритетных показателей составляют содержание следующего раздела.

Методология формирования показателей человеческого капитала для анализа со стороны руководства

Разработка методического подхода к интеграции показателей человеческого капитала в АСР опирается на четыре взаимосвязанных принципа, определяющих логику отбора показателей и формирования алгоритма их применения.

Принцип нормативной совместимости предполагает, что каждый включаемый показатель должен одновременно выводиться из требований ISO 30414:2025 и соответствовать конкретному пункту ISO 9001:2015 (с учетом изменений ISO 9001:2026). Только при двустороннем нормативном основании показатель может быть введен в АСР без риска интерпретационного конфликта в ходе сертификационного аудита.

Принцип измеримости означает, что каждый показатель сопровождается формулой расчета, единицей измерения и рекомендуемым целевым ориентиром, верифицируемым на основе международной практики. Декларативные характеристики («уровень компетентности высокий», «персонал вовлечен») из состава показателей исключаются.

Принцип соразмерности устанавливает ограничение на число базовых показателей. Практика АСР свидетельствует, что перегрузка входных данных снижает качество управленческих решений. В связи с этим разграничиваются базовые показатели (обязательные для организаций любого размера) и расширенные (рекомендуемые для организаций с развитой HR-аналитической инфраструктурой).

Принцип пригодности для ESG-раскрытия требует, чтобы отобранные показатели соответствовали областям раскрытия по ESRS S1 (собственная рабочая сила) – европейскому стандарту нефинансовой отчетности, признанному ISO 30414:2025 в качестве совместимой системы. Это обеспечивает возможность двойного использования данных: для управленческих целей в рамках СМК и для внешней ESG-отчетности.

На основании сравнительного анализа текстов ISO 30414:2025, ISO 9001:2015 и DIS ISO 9001:2026 автором составлена матрица, устанавливающая однозначное нормативное соответствие между областями измерения ЧК и требованиями СМК (таблица 1).

Из матрицы следует, что 7 из 11 областей ISO 30414:2025 имеют прямое нормативное соответствие требованиям ISO 9001 и релевантны для включения в АСР. Оставшиеся четыре области – состав персонала, разнообразие, подбор и затраты на персонал (Workforce Composition, Diversity, Recruitment, Costs) – носят для АСР вспомогательный характер и могут использоваться в качестве расширенных показателей при наличии аналитической инфраструктуры.

Таблица 1

Матрица соответствия ISO 30414:2025 и ISO 9001:2026 (проект)

Область ISO 30414:2025	Функциональная характеристика	Пункт ISO 9001:2015	Изменение ISO 9001:2026	Роль в АСР (п. 9.3.2)
Навыки, способности и развитие (Skills, Capabilities and Development) – 6 метрик	Устойчивость компетентностной базы (Robustness)	7.2 Компетентность	Усилен: явный акцент на эффективности действий	Адекватность ресурсов (п. 9.3.2d)
Текучесть персонала (Workforce Turnover) – 4 метрики	Уязвимость кадрового состава (Fragility)	7.1.2 Ресурсы: персонал	7.1 (ресурсы)	Адекватность ресурсов (п. 9.3.2d)
Лидерство, культура и вовлечённость (Leadership, Culture and Engagement) – 6 метрик	Синергия внутренних заинтересованных сторон (Internal stakeholder synergies)	5.1 Лидерство; 5.3 Роли	Новое: оценка культуры качества в АСР	Новый входной блок (п. 9.3.2, DIS 2026)
Соответствие требованиям, этика и трудовые отношения (Compliance, Ethics and Workforce Relations) – 11 метрик	Управление и социальные обязательства (Governance and social commitments)	5.1.1 Лидерство и приверженность	Новое: этика топ-менеджмента как требование	Новый входной блок (п. 9.3.2, DIS 2026)
Мобильность и планирование преемственности (Mobility and Succession Planning) – 9 метрик	Устойчивость к потере кадров (Resilience)	6.1 Риски и возможности	6.1 (расширен: риски ресурсов)	Риски и возможности (п. 9.3.2e)
Производительность труда (Productivity) – 4 метрики	Результативность распределения финансовых ресурсов (Effectiveness of financial allocations)	9.1 Мониторинг и измерения	9.1.3 (расширен)	Результативность СМК (п. 9.3.2c)
Здоровье, безопасность и благополучие персонала (Health, Safety and Well-being) – 5 метрик	Благополучие персонала (Wellness of workforce)	7.1.4 Производственная среда	7.1.4 (расширен: психологическая безопасность)	Адекватность ресурсов (п. 9.3.2d)

Ключевым здесь является то, что две области – Лидерство, культура и вовлечённость (Leadership, Culture and Engagement) и Соответствие требованиям, этика и трудовые отношения (Compliance, Ethics and Workforce Relations) – приобретают статус обязательных входных данных АСР именно в версии ISO 9001:2026: в редакции 2015 года они присутствовали лишь как декларативные принципы лидерства, не требующие измеримого подтверждения.

На основании матрицы соответствия, принципов соразмерности и измеримости из каждой релевантной области ISO 30414:2025 отобран один – два

показателя с наибольшим диагностическим потенциалом применительно к СМК. Итоговый перечень состоит из 8 базовых показателей (таблица 2).

Таблица 2

Базовые показатели человеческого капитала для АСР: расчетные формулы и целевые ориентиры

№	Показатель	Область ISO 30414	Формула расчета	Целевой ориентир	Пункт ISO 9001
1	Competency Compliance Rate (CCR) – коэффициент компетентности	Skills & Development	$CCR = 1 - \frac{\sum Gap_j}{\sum MaxGap_j}$, где Gap_j – взвешенный дефицит по компетенции j	≥ 0,85	7.2
2	Training Effectiveness Rate (TER) – результативность обучения	Skills & Development	$TER = \frac{N_{\text{подтвержденных_компетенций}}}{N_{\text{обученных}}} \times 100\%$	≥ 80%	7.2, 7.3
3	Voluntary Turnover Rate (VTR) – добровольная текучесть	Workforce Turnover	$VTR = \frac{N_{\text{доброволь_увол}}}{N_{\text{среднеспис}}} \times 100\%$	≤ 10%	7.1.2
4	Succession Coverage Ratio (SCR) – охват преемственностью	Mobility & Succession	$SCR = \frac{N_{\text{ключ_должн_с_преемником}}}{N_{\text{ключ_должн}}} \times 100\%$	≥ 70%	6.1
5	Quality Culture Index (QCI) – индекс культуры качества	Leadership, Culture & Engagement	Агрегированный показатель: $QCI = 0{,}5 \times eNPS_{norm} + 0{,}3 \times EI_{norm} + 0{,}2 \times SR_{norm}$, где $eNPS_{norm}$ – нормированный Employee Net Promoter Score, EI_{norm} – индекс вовлеченности, SR_{norm} – Suggestion Rate	≥ 0,75	5.1, 5.3
6	Ethics Breach Rate (EBR) – норма этических нарушений	Compliance, Ethics & Workforce Relations	$EBR = \frac{N_{\text{зафиксир_нарушений}}}{N_{\text{персонала}}} \times 1000$	< 5 на 1 000 чел.	5.1.1
7	Human Capital Productivity Index (HCPI) – индекс производительности ЧК	Productivity	$HCPI = \frac{VAPE_{\text{орг}}}{VAPE_{\text{бенчмарк}}}$, где VAPE (Value Added per FTE) = (Операц. доход + Экономия на затратах качества) / Среднеспис. численность	0,9–1,2 (в пределах ±10% от бенчмарка)	9.1
8	Workforce Availability Rate (WAR) – коэффициент доступности персонала	Health, Safety & Well-being	$WAR = \frac{N_{\text{рабочих_дней}} - N_{\text{дней_по_болезни/НС}}}{N_{\text{рабочих_дней}}} \times 100\%$	≥ 95%	7.1.4

Целевые ориентиры установлены на основе международной практики раскрытия по ISO 30414 и данных организаций, применяющих стандарт в промышленном секторе [9, 10]. Ориентиры не являются абсолютными: каждая организация адаптирует их к отраслевому контексту, фиксируя принятые значения в документации СМК.

Методический алгоритм интеграции показателей человеческого капитала в АСР

Предлагаемый методический алгоритм реализуется в рамках цикла PDCA и структурирован в пять последовательных этапов. Алгоритм проектировался как встраиваемый в существующий порядок подготовки и проведения АСР без изменения его организационной формы – путем расширения состава входных данных и введения нового документационного блока.

Этап 1. Проектирование системы показателей ЧК для АСР (Plan)

Организация формирует «Карту данных человеческого капитала для АСР» – внутренний документ СМК, фиксирующий для каждого из 8 базовых показателей: источник данных, ответственное подразделение, периодичность сбора, целевой ориентир и правило интерпретации отклонения. Данный документ может оформляться как приложение к Положению об АСР или как самостоятельная рабочая инструкция. На этом же этапе устанавливается связь с действующей HR-документацией: матрицами компетенций, базами данных обучения, результатами опросов персонала.

Ключевое проектное решение этапа – разграничение показателей по частоте измерения: ежеквартальный мониторинг (VTR, WAR, QCI) и годовая оценка для включения в АСР (CCR, TER, SCR, EBR, HCPI). Это разграничение предотвращает избыточность данных и концентрирует внимание руководства на стратегически значимых тенденциях.

Этап 2. Сбор и обработка данных (Do)

В течение периода между АСР владельцы показателей (как правило, руководитель службы управления персоналом совместно с директором по качеству) собирают и консолидируют данные в соответствии с Картой. Результатом этапа является «Отчет о состоянии человеческого капитала» (HC Report) – документ, аналогичный по функции внутреннему отчету ISO 30414, но адаптированный к формату входных данных АСР.

Отчет включает: значения всех 8 базовых показателей за период; сравнение с целевыми ориентирами и данными предыдущего периода (тренд); интерпретацию по трехуровневой сигнальной системе (см. п. 3.2); предварительные выводы с предложением управленческих решений. Подготовка отчета должна завершаться не позднее чем за 5 рабочих дней до даты проведения АСР.

Этап 3. Рассмотрение блока ЧК в рамках АСР (Check)

Блок «Состояние человеческого капитала» вводится как самостоятельный пункт повестки АСР, следующий непосредственно за анализом результативности процессов (п. 9.3.2c) и предшествующий рассмотрению рисков (п. 9.3.2e). Такое позиционирование логически согласовано: данные о компетентности и вовлеченности персонала одновременно характеризуют и достигнутые результаты, и риски ресурсообеспечения.

По каждому показателю ЧК в ходе АСР фиксируется: (а) фактическое значение; (б) тренд (улучшение / стабильность / ухудшение); (в) уровень

сигнала по системе светофора; (г) предлагаемое решение с ответственным и сроком.

Этап 4. Принятие решений и формирование выходных данных (Act)

По результатам рассмотрения блока ЧК принимаются конкретные управленческие решения, которые фиксируются в выходных данных АСР (п. 9.3.3 ISO 9001): о выделении ресурсов на обучение и развитие персонала; об изменении целей в области качества в части компетентности и культуры; о превентивных действиях при желтом уровне сигнала; о корректирующих действиях при красном. Каждое решение содержит ответственного исполнителя, срок и измеримый критерий выполнения, что обеспечивает прослеживаемость на следующем АСР (замыкание цикла по п. 9.3.2a).

Этап 5. Использование данных АСР для ESG-раскрытия (интеграция)

При наличии нефинансовой отчетности данные HC Report и зафиксированные в АСР управленческие решения становятся верифицированным источником для S-раздела ESG. Показатели VTR, SCR, WAR, EBR и QCI прямо соответствуют метрикам раскрытия ESRS S1 (собственная рабочая сила). Следует отметить, что данная интеграция не требует создания параллельных процессов: АСР уже является аудируемым документационным процессом СМК, что обеспечивает верифицируемость раскрываемых данных – ключевое требование к ESG-отчетности.

Понятие устойчивого развития применительно к СМК может быть определено как способность системы сохранять результативность и наращивать организационный потенциал в условиях изменчивости внешней среды – в частности, при кадровых флуктуациях, изменении технологического контекста и регуляторных требований. Такой подход обеспечивает устойчивость развития СМК по трем взаимосвязанным механизмам.

Первый механизм – превентивное управление кадровым ресурсом: регулярное измерение VTR, SCR и CCR позволяет выявлять угрозы деградации компетентностного потенциала до их материализации в форме несоответствий или сбоев процессов. Согласно международной практике ISO 30414, организации, систематически измеряющие показатели человеческого капитала, на 1,5–2 года опережают реактивные модели в выявлении кадровых рисков.

Второй механизм – измеримость культуры качества: включение QCI и EBR в АСР переводит нематериальную категорию «культуры качества» из декларативной в управляемую область. Это важно в свете требований ISO 9001:2026, поскольку обеспечивает доказательную базу для аудиторской оценки соответствия новым требованиям п. 5.1.1 и п. 9.3.2.

Наконец, данные АСР, используемые для ESG-раскрытия по ESRS S1, формируют доверие внешних партнёров – а значит, расширяют ресурсную базу устойчивого развития.

Проведенное исследование позволяет сформулировать следующие научные и практические результаты.

1. Матрица нормативного соответствия ISO 30414:2025 – ISO 9001:2026 (DIS), представленная в разделе 2, устанавливает что две области приобретают статус обязательных входных данных АСР непосредственно в версии ISO 9001:2026 в связи с введением требований к измеримой оценке культуры качества и этики в организации.

3. Сформирован перечень из 8 базовых показателей человеческого капитала (CCR, TER, VTR, SCR, QCI, EBR, HCPI, WAR) с расчетными формулами, целевыми ориентирами и нормативным обоснованием, пригодный для включения в АСР в организациях любого размера.

4. Разработан пятиэтапный методический алгоритм интеграции показателей ЧК в АСР (Plan – Do – Check – Act – ESG-раскрытие.

5. Разработанный подход решает три практические задачи одновременно – управленческие решения о ресурсах в СМК получают измеримое обоснование; организация заблаговременно выстраивает соответствие требованиям ISO 9001:2026; данные АСР становятся верифицированным источником для раскрытия S-компонента ESG по стандарту ESRS S1.

Список литературы

1. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. – Geneva : ISO, 2015. – 29 p.
2. ISO/DIS 9001:2026. Quality management systems – Requirements. Draft International Standard. – Geneva : ISO, 2025.
3. ISO 30414:2025. Human resource management – Requirements and recommendations for human capital reporting and disclosure. – Geneva : ISO, 2025. – 30 p.
4. Вербицкая Н.Р. Интеграция HR-аналитики в систему менеджмента качества: от компетенций к экономическому эффекту // Управление качеством. – 2025. – № 12. – С. 40–44. – DOI: 10.33920/pro-01-2512-06
5. Вербицкая, Н. Р. Методика стоимостной оценки человеческого капитала в системах менеджмента качества (на основе ISO 30414) / Н. Р. Вербицкая // Вестник факультета управления СПбГЭУ. – 2025. – № 24. – С. 35–49. – EDN ZDSBAQ.
6. Sustainability Directory. Global Human Capital Standard Forces Workforce Data into Financial Reporting [Электронный ресурс]. – URL: https://news.sustainability-directory.com/esg/global-human-capital-standard-forces-workforce-data-into-financial-reporting/ (дата обращения: 26.03.2026)
7. Ларцева, Т. А. Процесс анализа системы менеджмента качества организации со стороны руководства / Т. А. Ларцева, О. В. Алексашина, Т. А. Магай // Журнал социологических исследований. – 2020. – Т. 5, № 3.
8. Nguyen T.H.T. et al. Strategic Talent Management as a Driver of Quality, Innovation, and Competitiveness // Quality Innovation Prosperity. – 2025. – Vol. 29, № 2. – DOI: 10.12776/qip.v29i2.2281.
9. ISO-Library. ISO 30414 – Human Capital Reporting [Электронный ресурс]. – URL: https://iso-library.com/standard/30414/ (дата обращения: 20.03.2026)
10. Consultivo. ISO 30414 Human Capital Reporting – Case Study: Global Manufacturing Firm [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://consultivo.in/blogs/iso-30414-human-capital-reporting/ (дата обращения: 20.03.2026)
11. Московская биржа. Руководство по ESG-отчетности для российских компаний. – Москва : ПАО Московская биржа, 2022. – URL: https://esgguide.moex.com/3/0/index.html (дата обращения: 20.03.2026).

12. MSI International. ISO 9001:2026 Update: Ethics & Culture Importance [Электронный ресурс]. – URL: https://msi-international.com/iso-90012026-update-ethics-culture-importance/ (дата обращения: 20.03.2026)
13. Advisera. ISO 9001:2026 Revision – Key Changes and How to Prepare [Электронный ресурс]. – URL: https://advisera.com/articles/iso-9001-2026-revision-key-changes/ (дата обращения: 20.03.2026)
14. ISO Templates. ISO 9001 Clause 9.3 Management Review [Электронный ресурс]. – URL: https://resources.iso-templates.com/blog/iso-9001-clause-9.3-management-review (дата обращения: 20.03.2026)
15. Moyo, B. Effect of people engagement on performance of ISO 9001:2015 certified organisations in Zimbabwe / B. Moyo // International Journal of Business Management Studies. – 2022. – Vol. 3, № 7. – P. 55–65

Мухин М.П.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
muxin_10@mail.ru

ПОШАГОВАЯ МЕТОДИКА ВНЕДРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Аннотация. В статье представлена пошаговая методика внедрения и контроля эффективности системы работы с обратной связью на машиностроительном предприятии в рамках системы менеджмента качества. Актуальность исследования обусловлена тем, что способность эффективно интерпретировать «голос потребителя» превратилась в стратегический фактор конкурентоспособности. В качестве основного инструментария предлагается методика, базирующаяся на цикле непрерывного улучшения PDCA. Подробно описываются четыре последовательных этапа: стратегическое планирование и подготовка, пилотное внедрение и адаптация, контроль и оценка результативности с использованием ключевых показателей эффективности, а также этап постоянного совершенствования и интеграции в корпоративную культуру. Отдельное внимание уделяется критическим факторам успеха: поддержке со стороны руководства, вовлечённости персонала и адекватности инструментов анализа объёму поступающей информации. Статья предназначена для руководителей и специалистов служб качества, стремящихся превратить обратную связь из формальной процедуры в действенный инструмент управления, повышения качества продукции и устойчивого конкурентного преимущества.

Ключевые слова: система менеджмента качества, обратная связь, методика внедрения, непрерывное улучшение, управление качеством.

Mukhin M.P.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
muxin_10@mail.ru

A STEP-BY-STEP METHOD FOR IMPLEMENTING AND MONITORING THE EFFECTIVENESS OF FEEDBACK

Abstract. The article presents a step-by-step methodology for implementing and monitoring the effectiveness of a feedback management system at a mechanical engineering enterprise within the framework of a quality management system. The relevance of the study is due to the fact that the ability to effectively interpret the «voice of the customer» has become a strategic factor of competitiveness. The proposed methodology is based on the PDCA continuous improvement cycle. Four sequential stages are described in detail: strategic planning and preparation; pilot implementation and adaptation; monitoring and performance evaluation using key performance indicators (KPIs); and the stage of continuous improvement and integration into corporate culture. Special attention is paid to critical success factors: top management support, staff engagement, and the adequacy of analytical tools to the volume of incoming information. The article is intended for quality managers and specialists seeking to transform feedback from a formal procedure into an effective management tool for improving product quality and achieving sustainable competitive advantage.

Keywords: quality management system, feedback, implementation methodology, continuous improvement, quality management.

Для современного машиностроительного предприятия способность не просто собирать, а эффективно слышать и правильно интерпретировать «голос потребителя» трансформировалась из требования стандартов качества, таких как ISO 9001, в насущную стратегическую необходимость. В условиях обостряющейся конкуренции и стремительно меняющихся рыночных ожиданий, хорошо отлаженная система работы с обратной связью становится мощным инструментом. Как отмечают исследователи, интеграция требований заказчиков в систему менеджмента качества в условиях цифровой трансформации требует разработки специальных информационно-экономических моделей учета обратной связи в рамках стандартов серии 9000 ГОСТ Р ИСО [1]. Система работы с обратной связью предоставляет предприятию возможность не только оперативно реагировать на возникающие проблемы и несоответствия, но и, что более важно, выявлять скрытые потребности клиентов, генерировать ценные идеи для инноваций. В конечном счете это позволяет строить долгосрочные, доверительные отношения с потребителями, обеспечивая тем самым устойчивое конкурентное преимущество на рынке [2].

Несмотря на осознание важности обратной связи, на практике многие предприятия сталкиваются со значительными трудностями: сбор информации носит эпизодический характер, анализ проводится поверхностно, а полученные данные не находят должного применения в процессах принятия управленческих решений. Преодолеть эти барьеры и превратить обратную связь из пассивной информации в действенный инструмент управления позволяет внедрение комплексной, систематизированной методики, охватывающей весь жизненный цикл работы с ней. В частности, применение механизма обратных связей в рамках процессного подхода к управлению на машиностроительных предприятиях позволяет формировать корректирующие

действия по улучшению производственных процессов [3]. Системный подход к анализу критических параметров качества на основе обратной связи от клиентов способствует повышению производительности и достижению концепции «нулевого брака» [4].

Данный материал предлагает практическое руководство по внедрению такой методики, основанной на принципах цикла непрерывного улучшения PDCA. Такой подход обеспечивает итерационный характер внедрения, позволяя постепенно отлаживать систему, и закладывает прочную основу для ее постоянного совершенствования. Данный подход представлен на рисунке.

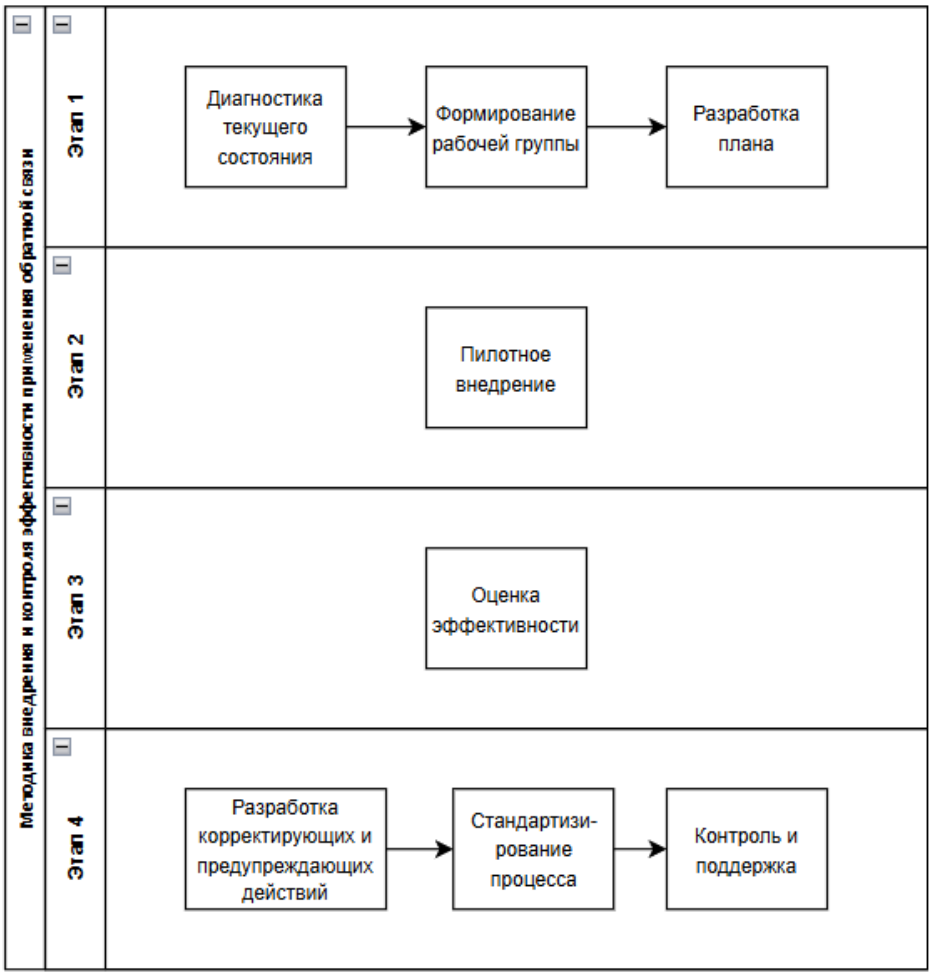


Рис. Методика внедрения и контроля эффективности применения обратной связи

Этап 1. Стратегическое планирование и подготовка. Данный этап требует тщательного анализа, глубокого осмысления текущей ситуации и принятия взвешенных решений. Игнорирование шагов планирования часто становится основной причиной неудач подобных инициатив [5].

Начинать следует с проведения диагностики текущего состояния дел на предприятии в области работы с обратной связью. Необходимо объективно оценить, как именно предприятие собирает, обрабатывает и исполь-

зует информацию от потребителей на данный момент. Диагностика включает анализ существующей документации системы менеджмента качества, касающейся обратной связи. Однако гораздо важнее провести интервью с сотрудниками ключевых подразделений, работающих с обратной связью. Это поможет понять реальные практики, выявить существующие барьеры и неформальные каналы поступления информации. Тщательный анализ архива жалоб, рекламаций, данных о несоответствиях и другой релевантной информации поможет выявить так называемые «болевые точки» – наиболее проблемные области. Результатом этого этапа диагностики должно стать структурированное понимание исходной ситуации, существующих рисков и первоочередных областей, требующих улучшения.

На основе проведенной диагностики формулируются конкретные, измеримые, достижимые, релевантные и ограниченные во времени цели совершенствования процесса работы с обратной связью.

Ключевым организационным шагом на этапе планирования является формирование компетентной рабочей группы. В ее состав должны войти не только представители службы качества, но и сотрудники тех подразделений, которые непосредственно взаимодействуют с клиентами или чья деятельность напрямую влияет на качество продукции и удовлетворенность потребителей.

Далее рабочая группа приступает к разработке или адаптации процедур и инструментов для работы с обратной связью. Необходимо формализовать все каналы сбора обратной связи. Важно четко прописать алгоритмы реагирования на полученную информацию, процедуры эскалации проблем и механизмы информирования клиента о принятых мерах, обеспечивая стандартизированный подход на всем цикле процесса.

Завершается этап планирования разработкой детального плана внедрения. Этот план должен включать перечень конкретных мероприятий, сроки их выполнения, объективную оценку необходимых ресурсов, а также ответственные лица.

Этап 2. Внедрение и адаптация. Рекомендуется начинать с пилотного внедрения на каком-либо ограниченном участке. Это может быть один тип продукции, один конкретный отдел или работа с определенной группой ключевых клиентов. Пилотный проект позволяет с меньшими рисками выявить непредвиденные проблемы, проверить разработанные процедуры на практике, собрать обратную связь уже от участников пилотного проекта и, при необходимости, доработать методику перед ее полномасштабным развертыванием на всем предприятии. На этапе внедрения крайне важно обеспечить всестороннюю поддержку персонала, оперативно отвечать на возникающие вопросы и помогать решать возникающие трудности.

Этап 3. Контроль и оценка результативности. Любое внедрение без последующего контроля и оценки не имеет смысла и не может считаться завершенным. Этот этап должен стать регулярной, системной практикой.

Мониторинг процессов работы с обратной связью включает сбор данных о том, как функционирует система.

Важнейшим элементом этого этапа является оценка эффективности внедренной системы. Она проводится через анализ динамики заранее определенных ключевых показателей эффективности. Необходимо сравнивать текущие значения этих показателей с зафиксированными до начала внедрения и с целевыми показателями, установленными на этапе планирования. Кроме количественных показателей эффективности важна и качественная оценка. Она может включать анализ результатов внутренних аудитов системы менеджмента качества, данные самооценки зрелости системы работы с обратной связью, а также анализ экономического эффекта от внедренных улучшений.

Этап 4. Совершенствование и интеграция. Данные, полученные на этапе 3, служат основой для дальнейших улучшений и развития системы. Необходимо тщательно анализировать результаты оценки, выявлять не только достигнутые успехи, но и сохраняющиеся проблемы, где система работает не так эффективно, как ожидалось. Применение методов анализа корневых причин поможет понять, почему возникают те или иные сбои. На основе этого анализа разрабатываются и реализуются корректирующие и предупреждающие действия.

Успешные практики и усовершенствованные процедуры должны быть стандартизированы и закреплены в обновленной документации системы менеджмента качества. Конечная цель этого этапа – интегрировать работу с обратной связью в повседневную деятельность и корпоративную культуру предприятия. Обратная связь должна стать привычным и ценным ресурсом для всех подразделений, а ее анализ – неотъемлемой частью регулярного менеджмента и стратегического планирования. Это достигается через постоянное информирование сотрудников о важности обратной связи, поощрение инициатив, направленных на улучшение работы с ней, и включение вопросов, связанных с обратной связью, в повестку дня совещаний на всех уровнях управления.

Для обеспечения устойчивой и эффективной работы системы обратной связи важно не только успешно пройти все этапы ее внедрения, но и обеспечить постоянный контроль и поддержку ее функционирования. Ключевыми факторами успеха являются явная и реальная поддержка со стороны руководства, которая выражается в выделении необходимых ресурсов и требовании конкретных результатов. Не менее важна вовлеченность персонала, создание мотивации и понимания ценности обратной связи на всех уровнях организации. Инструменты анализа и обработки информации должны соответствовать объему и характеру поступающей обратной связи.

Предложенная пошаговая методика, основанная на цикле PDCA, предоставляет машиностроительным предприятиям структурированный и логичный подход к ее решению. Систематическое прохождение этапов планирования, внедрения, контроля и совершенствования позволяет не только

наладить эффективную работу с «голосом потребителя», но и глубоко встроить эту работу в организационную культуру, сделав клиентоориентированность и стремление к улучшению неотъемлемой частью основы предприятия. Это, в свою очередь, является надежным залогом повышения качества выпускаемой продукции, роста удовлетворенности клиентов и, как следствие, достижения устойчивого успеха на рынке.

Список литературы

1. Хаймович И.Н. Стандартизация и кастомизация в машиностроении: учет обратной связи для минимизации рисков / Матвеев И.С. – III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки» // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования, 2025. № 6(87). – с. 480–485.
2. Гаврикова Н.В. Роль обратной связи в системе менеджмента качества / Наумов С.М., Колдина Д.А.- Тенденции развития науки и образования,2020.-с. 106–109.
3. Лютов А.Г. Модель комплексного автоматизированного управления процессами в машиностроении / Рябов Ю.В. – СТИН, 2016. № 5. – с. 2–7.
4. Stephan Thangaiah I.S. Analysing of customer feedback on critical quality parameters to improve productivity in manufacturing / Sharma V., Sundharam V.N. – International Journal of Productivity and Quality Management. 2018. № 3. – с. 349–368.
5. Истомина Е. Е. Проектирование и внедрение СМК промышленного предприятия / Куранов М. Н. // Компетентность. 2019. № 8. – с. 40–46.

Гришаева С.А.
к.т.н., доцент кафедры 1105 «Управление качеством и сертификация»
Московский авиационный институт
Россия, Москва
grishaeva@list.ru
Суницкий Я.Р.
студент
Московский авиационный институт
Россия, Москва
sunitsky2018@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В ПРОЦЕССАХ ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются современные подходы к применению методов машинного обучения для прогнозирования отказов авиационной техники. На основе анализа трёх научных работ исследуются различные методики предиктивного обслуживания, включая анализ данных постполётных отчётов, обработку текстовой информации из бортовых журналов и оценку состояния компонентов по данным сенсоров. Особое внимание уделяется сравнительному анализу алгоритмов, методам подготовки данных и практической эффективности предложенных решений. Результаты показывают,

что комплексное применение машинного обучения позволяет снизить затраты на обслуживание до 40% и повысить доступность воздушных судов.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, машинное обучение, прогнозирование отказов, авиационная техника, анализ данных.

Grishaeva S.A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the 1105 Department of Quality management and certification
Mocow Aviation Institute
Russia, Moscow
grishaeva@list.ru
Sunitsky Ya.R.
Student
Mocow Aviation Institute
Russia, Moscow
sunitsky2018@yandex.ru

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING FAILURES IN THE PROCESSES OF MAINTENANCE AND OPERATION OF AVIATION EQUIPMENT

Abstract. This article discusses modern approaches to the application of machine learning methods for predicting failures of aviation equipment. Based on the analysis of three scientific papers, various predictive maintenance techniques are being investigated, including analyzing data from post-flight reports, processing text information from flight logs, and assessing the condition of components based on sensor data. Special attention is paid to the comparative analysis of

Keywords: predictive maintenance, machine learning, failure prediction, aviation technology, data analysis.

Современная авиационная отрасль сталкивается с беспрецедентным ростом объёмов данных, генерируемых в процессе эксплуатации воздушных судов. По данным Всемирного банка, ежегодное количество пассажиров, перевозимых воздушным транспортом, демонстрирует устойчивую тенденцию к росту [1]. Ключевым параметром эффективности авиационной индустрии является доступность воздушных судов – процент времени, в течение которого самолёт находится в исправном состоянии и готов к выполнению полётов.

Традиционно обслуживание авиационной техники осуществлялось по плановому графику, однако такой подход имеет существенные недостатки. Внезапные отказы, возникающие между запланированными интервалами обслуживания, приводят к простою техники, финансовым потерям и снижению удовлетворённости клиентов. В этой связи предиктивное обслуживание становится стратегически важным направлением развития отрасли.

Целью данной работы является комплексный анализ современных методов машинного обучения для прогнозирования отказов авиационной техники на основе трёх научных исследований, опубликованных в период с 2017 по 2024 год.

Типы данных в авиационной отрасли

Для эффективного прогнозирования отказов необходимо понимать природу данных, генерируемых в процессе эксплуатации авиационной техники. Согласно исследованию Корвесиса [1], данные можно разделить на три основные категории:

Временные ряды сенсорных измерений

Датчики, установленные на борту воздушного судна, генерируют непрерывный поток измерений: давление, температура, скорость вращения и другие параметры. Сотни сенсоров с различной частотой дискретизации могут генерировать несколько гигабайт данных для каждого полёта. Эти данные наиболее полно отражают состояние компонентов в реальном времени.

Журналы событий (Event Logs)

Системы мониторинга генерируют события, отражающие состояние оборудования. Эти события соответствуют отказам и фиксируются в постполётных отчётах (Post Flight Reports – PFR). В отличие от сенсорных данных, журналы событий имеют значительно меньший объём и могут передаваться в централизованную инфраструктуру в реальном времени.

Бортовые журналы обслуживания (Logbook)

Бортовой журнал содержит информацию о всех действиях по техническому обслуживанию, выполненных на воздушном судне, включая замены компонентов, ремонты и проблемы, сообщённые экипажем. Хотя эти данные не генерируются автоматически и их объём ограничен, содержащаяся в них информация незаменима для эффективного предиктивного обслуживания.

Анализ первого исследования: Прогнозирование отказов по постполётным отчётам

В диссертационной работе Корвесиса [1] представлена методика прогнозирования отказов систем воздушного судна на основе истории постполётных отчётов. Основная цель – разработка системы оповещения, которая уведомляет авиационных инженеров о предстоящих отказах заблаговременно, предоставляя достаточное время для планирования соответствующих действий по техническому обслуживанию.

Автор предлагает регрессионный подход для аппроксимации риска возникновения целевого события. Функция риска $r(x_i)$ должна обладать следующим свойством: монотонно возрастать по времени и достигать максимального значения в конце каждого эпизода, когда происходит отказ.

На рисунке 1 показана сигмоидальная функция риска для эпизода длиной 300 полётов. Параметры s и c соответствуют крутизне и сдвигу функ-

ции. Выбор правильного значения для с имеет критическое значение, поскольку он представляет ожидаемое время до целевого события, при котором начнут появляться коррелированные события.

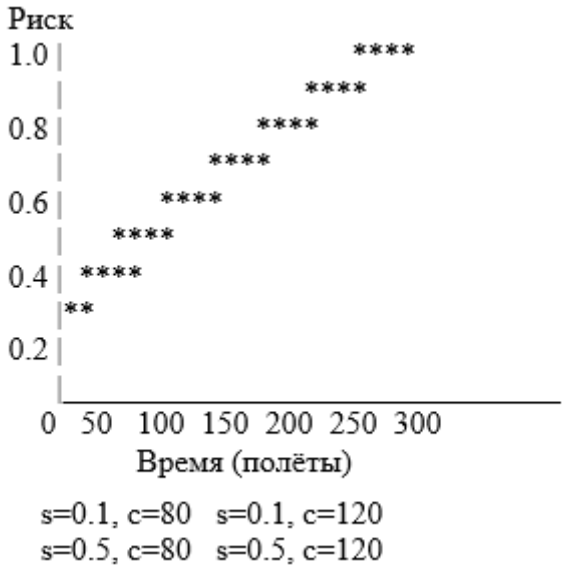


Рис. 1. Функция риска для отдельного эпизода

Экспериментальная оценка проводилась на данных от флота из 60 воздушных судов, охватывающих несколько лет эксплуатации. Алфавит событий состоял из более чем 3400 различных отказов.

Как видно из таблицы 1, предложенный метод на основе Random Forest Regression (RFR) значительно превосходит базовый подход с использованием SVM. Точность прогнозирования составила 64% при очень низком количестве ложных срабатываний.

Таблица 1

Результаты прогнозирования на уровне эпизодов

Метод	Точность	Полнота	F1-мера
SVM (базовый)	0.21	0.02	0.03
Random Forest	0.64	0.23	0.34

На рисунке 2 демонстрируется влияние различных пороговых значений на финальное прогнозирование. Установка правильного порогового значения может выполняться в соответствии с желаемыми показателями TPR и FPR, а также временем до целевого события, при котором желательно выполнение прогноза.

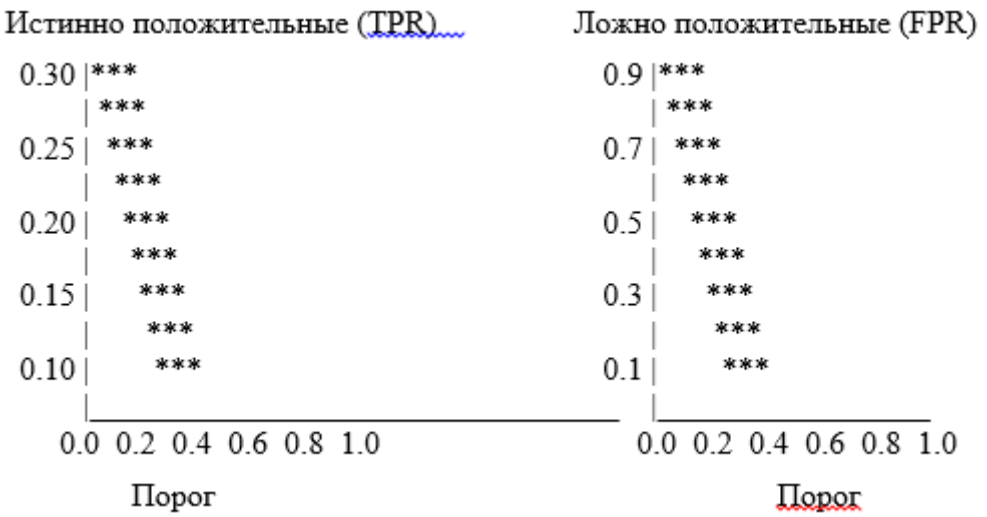


Рис. 2. Влияние пороговых значений на количество истинных и ложных срабатываний

Важность прогнозирования отказов и возможное влияние предложенного подхода можно продемонстрировать, изучив его воздействие на авиакомпании. Согласно данным исследования [1], неожиданное возникновение целевого события может привести либо к задержке рейса, что стоит авиакомпании примерно 4000 USD, либо к отмене рейса, costing 15000 USD. В течение года наблюдений за несколькими авиакомпаниями его возникновение обошлось примерно в 2000000 USD, и, следовательно, возможность предсказать 20% его возникновений вовремя может привести к экономии до 400000 USD в год для этого конкретного отказа.

Анализ второго исследования: Прогнозирование отказов авиационных двигателей.

Во второй статье [2] рассматривается прогнозирование отказов авиационных двигателей с использованием датасета C-MAPSS (Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation), разработанного NASA. Этот датасет содержит данные о 40 двигателях, разделённых на четыре подмножества.

Подмножество 1: Один режим отказа
Подмножество 2: Один режим отказа
Подмножество 3: Два режима отказа
Подмножество 4: Два режима отказа

Каждый двигатель работает до катастрофического отказа
Циклы полёта: 60-100 циклов на двигатель
18 временных рядов сигналов

Рис. 3. Описание режимов отказа в датасете N-CMAPSS

Авторы предлагают комплексный подход к подготовке данных, включающий четыре основных этапа:

Этап 1: Гистограммы для анализа распределения (рис. 4)



Рис. 4. Распределение данных датасета N-CMAPSS

Гистограмма обеспечивает чёткое графическое представление частот различных значений изучаемой переменной. Форма гистограммы даёт немедленное представление о центральной тенденции и общей форме распределения данных.

Этап 2: Балансировка данных (SMOTE) (рис. 5)

Проблема несбалансированных данных является серьёзной проблемой в машинном обучении. Когда один класс значительно превосходит другой, это может привести к смещённой производительности модели.

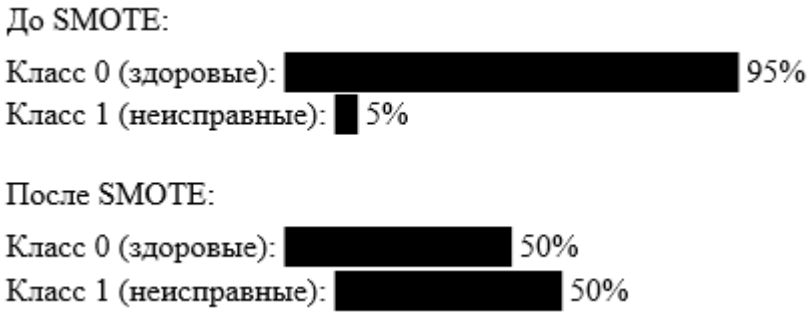


Рис. 5. Несбалансированные классы данных

Этап 3: Сглаживание данных (SMA) (рис. 6)

Использование простого скользящего среднего (Simple Moving Average – SMA) позволяет сгладить краткосрочные колебания и подчеркнуть общую тенденцию в данных.



Рис. 6. Датасет до и после сглаживания данных

Этап 4: Нормализация данных (Min-Max Scaler)

Метод Min-Max Scaler масштабирует и преобразует данные для соответствия указанному диапазону, обычно от 0 до 1, путём вычитания минимального значения и деления на диапазон значений в пределах признака.

В исследовании были обучены и разработаны четыре различных модели машинного обучения: Random Forest, Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN) и Gradient Boosting (рис. 7, табл. 2).

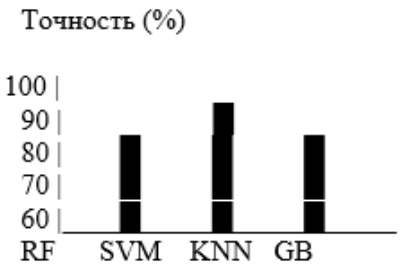


Рис. 7. Точность моделей с параметрами по умолчанию

Таблица 2

Производительность моделей после оптимизации гиперпараметров

Модель	Точность	Преимущества	Недостатки
Random Forest	85.2%	Интерпретируемость	Склонность к переобучению
SVM	82.7%	Хорошие границы решений	Высокая вычислительная сложность
KNN	80.5%	Простота реализации	Чувствительность к шуму
Gradient Boosting	90.9%	Лучшая точность	Требовательность к ресурсам

Как показано на рисунке 8, модель Gradient Boosting emerged как лидер, демонстрируя замечательную точность 90.9%. Этот выдающийся результат

подчёркивает способность модели эффективно захватывать сложные и нелинейные взаимосвязи, присутствующие в датасете.

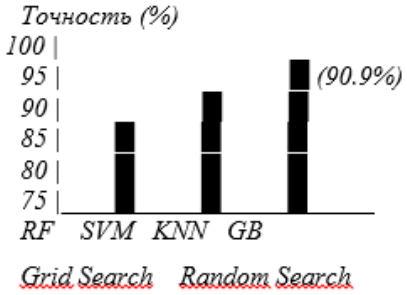


Рис. 8. Точность моделей после настройки гиперпараметров

Анализ третьего исследования: Гибридный метод подготовки данных

В третьей статье [3] предлагается гибридный метод подготовки данных для прогнозирования отказов авиационного оборудования. Исследование основано на данных турецкой авиационной компании за период два года.

Таблица 3

Входные и выходные переменные

Параметр	Описание
FH (Flight Hours)	Общая продолжительность полёта для оборудования
RM (Removals)	Количество снятий оборудования за 24 месяца
PR (Planned Removals)	Количество плановых снятий за 24 месяца
UR (Unplanned Removals)	Количество внеплановых снятий за 24 месяца
OR (Other Removals)	Количество других снятий за 24 месяца
FR (Faults with Removals)	Количество отказов со снятиями за 24 месяца
FPR (Faults Planned)	Количество отказов с плановыми снятиями
FUR (Faults Unplanned)	Количество отказов с внеплановыми снятиями
SR (Safe Removals)	Количество безопасных снятий за 24 месяца
NF (Output)	Количество отказов оборудования за 24 месяца

Предложенная модель состоит из двух этапов:

Этап 1: Отбор признаков (ReliefF)

Алгоритм ReliefF используется для оценки весов признаков и выбора наиболее эффективных параметров. Из девяти входных переменных были отобраны четыре наиболее значимых.

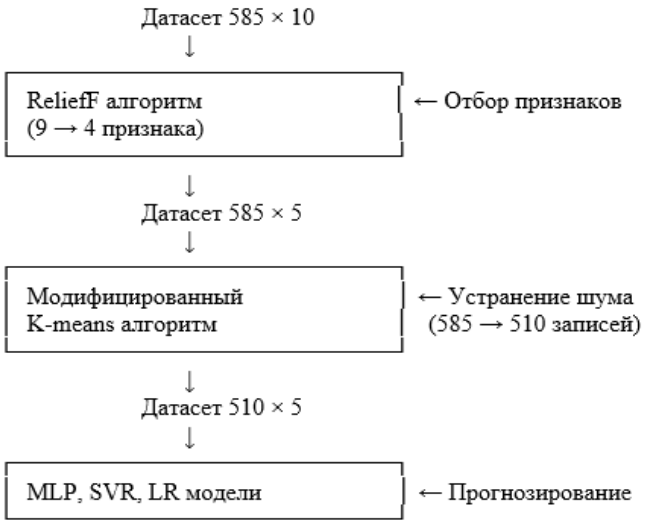


Рис. 9. Блок-диаграмма предложенной гибридной модели

Этап 2: Устранение шума

Модифицированный алгоритм K-means используется для устранения зашумлённых и несогласованных данных. В каждой кластерной группе удаляются 5 записей, наиболее удалённых от центра кластера (рис. 10).

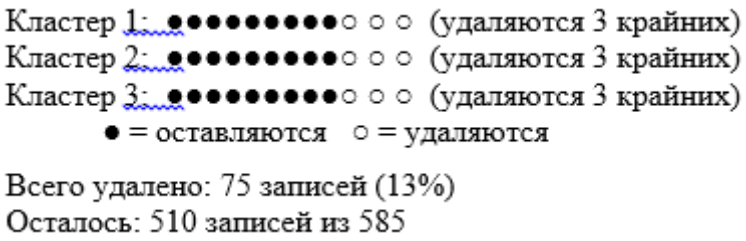


Рис. 10. Устранение данных в модифицированном алгоритме K-means

Результаты прогнозирования

Как показано в таблицах 4–6, применение гибридной модели подготовки данных значительно улучшило производительность всех алгоритмов. Линейная регрессия (LR) показала наилучшие результаты с коэффициентом корреляции 0.9316.

Таблица 4

Производительность моделей для датасета 585×10 (9 входов, 1 выход)

Метод	CC	MAE	RMSE
LR	0.8967	0.7341	1.0646
MLP	0.8925	0.8125	1.0992
SVR	0.9008	0.7410	1.0889

Таблица 5

Производительность моделей для датасета 585×5 (4 входа, 1 выход)

Метод	CC	MAE	RMSE
LR	0.8967	0.7341	1.0646
MLP	0.9127	0.7301	0.9853
SVR	0.9013	0.7415	1.0909

Таблица 6

Производительность моделей для датасета 510×5 (гибридная подготовка)

Метод	CC	MAE	RMSE
LR	0.9316	0.6807	0.8350
MLP	0.9284	0.6816	0.8555
SVR	0.9316	0.7108	0.8558

Сравнительный анализ трёх исследований (табл. 7–9)

Таблица 7

Сравнение подходов к подготовке данных

Исследование	Методы подготовки	Особенности
Корвесис [1]	Удаление редких событий, Collapsing событий, TF-IDF	Специфика текстовых данных
Bentaleb [2]	Гистограммы, SMOTE, SMA, Min-Max	Комплексный подход к числовым данным
Celikmih [3]	ReliefF, Modified K-means	Гибридный подход с устранением шума

Таблица 8

Сравнение алгоритмов и их производительности

Исследование	Алгоритмы	Лучший результат	Метрика
Корвесис [1]	Random Forest, SVM, HMM	RF: 64% точность	Precision
Bentaleb [2]	RF, SVM, KNN, Gradient Boosting	GB: 90.9%	Accuracy
Celikmih [3]	MLP, SVR, Linear Regression	LR: CC=0.9316	Correlation

Таблица 9

Сравнение типов используемых данных

Исследование	Тип данных	Объём	Источник
Корвесис [1]	PFR, Logbook, Сенсоры	60 самолётов, несколько лет	Европейские авиакомпании
Bentaleb [2]	C-MAPSS (сенсоры)	40 двигателей	NASA (симуляция)
Celikmih [3]	Maintenance records	585 записей, 2 года	Турецкая авиакомпания

Практические рекомендации для внедрения

На основе анализа трёх исследований можно сформулировать следующие рекомендации по внедрению систем предиктивного обслуживания в авиационной отрасли:

Этап 1: Сбор и интеграция данных

Объединение данных из различных источников (сенсоры, PFR, бортовые журналы);

Обеспечение качества и полноты данных;

Создание централизованного хранилища данных.

Этап 2: Подготовка данных

Применение методов балансировки данных (SMOTE);

Устранение шума и выбросов (Modified K-means);

Отбор наиболее значимых признаков (ReliefF);

Нормализация и сглаживание временных рядов.

Этап 3: Выбор и обучение моделей

Тестирование нескольких алгоритмов (Random Forest, Gradient Boosting, SVR);

Оптимизация гиперпараметров (Grid Search, Random Search);

Валидация на независимых тестовых данных.

Этап 4: Развёртывание и мониторинг

Интеграция моделей в существующие системы обслуживания;

Непрерывный мониторинг производительности моделей;

Регулярное переобучение на новых данных.

Проблемы и ограничения

Одной из основных проблем является качество доступных данных. В исследовании [1] отмечается, что бортовые журналы содержат много шума, включая опечатки и сокращения, что требует специальной предобработки с использованием word embeddings.

Проблема несбалансированных классов является распространённой в задачах прогнозирования отказов, так как отказы происходят реже, чем нормальная работа оборудования. Исследование [2] демонстрирует эффективность SMOTE для решения этой проблемы.

Сложные модели, такие как Gradient Boosting и нейронные сети, часто работают как «чёрный ящик», что затрудняет понимание причин прогнозируемых отказов. Это может быть проблемой для сертификации и принятия решений инженерами.

Некоторые методы требуют значительных вычислительных ресурсов для обучения и развёртывания, что может быть ограничивающим фактором для некоторых авиакомпаний.

Направления будущих исследований

На основе проведённого анализа можно выделить следующие перспективные направления для дальнейших исследований:

Интеграция данных из множественных источников – объединение сенсорных данных, постполётных отчётов и бортовых журналов в единую модель прогнозирования.

Объяснимый искусственный интеллект (XAI) – разработка методов, позволяющих интерпретировать решения моделей машинного обучения для повышения доверия со стороны инженеров.

Онлайн-обучение моделей – адаптация моделей к изменяющимся условиям эксплуатации в реальном времени.

Прогнозирование остаточного ресурса (RUL) – переход от бинарного прогнозирования отказов к оценке оставшегося срока службы компонентов.

Федеративное обучение – обучение моделей на распределённых данных без необходимости централизации, что важно для соблюдения требований конфиденциальности.

В данной статье был проведён комплексный анализ трёх научных исследований, посвящённых применению методов машинного обучения для прогнозирования отказов авиационной техники. Результаты анализа позволяют сделать следующие выводы:

Эффективность машинного обучения подтверждена. Все три исследования демонстрируют значительное улучшение показателей прогнозирования по сравнению с традиционными методами. Точность прогнозирования достигает 90.9% для Gradient Boosting [2] и коэффициента корреляции 0.9316 для линейной регрессии с гибридной подготовкой данных [3].

Качество подготовки данных критически важно. Гибридный подход к подготовке данных, включающий отбор признаков и устранение шума, может улучшить производительность моделей на 15–20% [3].

Разнообразие подходов. Каждое исследование предлагает уникальный подход: анализ постполётных отчётов [1], прогнозирование отказов двигателей [2] и гибридная подготовка данных [3]. Комбинирование этих подходов может дать наилучшие результаты.

Экономический эффект. Внедрение систем предиктивного обслуживания может привести к экономии до 400000 USD в год для одного типа отказа [1], что делает инвестиции в такие системы экономически обоснованными.

Необходимость комплексного подхода. Для достижения максимальной эффективности рекомендуется использовать данные из всех доступных источников (сенсоры, журналы событий, бортовые журналы) и применять ансамбль моделей машинного обучения.

Эффективность машинного обучения подтверждена. Все три исследования демонстрируют значительное улучшение показателей прогнозирования.

Дальнейшее развитие направлений предиктивного обслуживания в авиационной отрасли требует продолжения исследований в области интеграции данных, объяснимости моделей и адаптации к реальным условиям эксплуатации для улучшения. Сочетание передовых методов машинного

обучения с глубоким пониманием предметной области авиационной техники является ключом к созданию эффективных систем прогнозирования отказов и обеспечению качества обслуживания авиационной техники.

Список литературы

1. Korvesis P. Machine Learning for Predictive Maintenance in Aviation. PhD Thesis, Université Paris-Saclay, 2017. 140 p.
2. Bentaleb A., Toumlal K., Abouchabaka J. Predicting Aircraft Engine Failures using Artificial Intelligence // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2024. Vol. 15, No. 2. P. 944–949.
3. Celikmih K., Inan O., Uguz H. Failure Prediction of Aircraft Equipment Using Machine Learning with a Hybrid Data Preparation Method // Scientific Programming. 2020. Vol. 2020, Article ID 8616039. 10 p.
4. R.D. Pryazhevsky, E.Yu. Barmenkov, S.A. Grishaeva Application of Deep Machine Learning Methods to Solve Mathematical Physics Problems in Manufacturing // Proceedings of the 2024 International Conference; «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (2024 QM&TIS&IT) – 2024. – pp. 170–174
5. World Bank. Air transport, passengers carried. https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR
6. NASA. Prognostics Center of Excellence Data Set Repository. https://www.nasa.gov/content/prognostics-center-of-excellence-data-set-repository
7. Васильев, В. И. Контроль и диагностика технического состояния авиационных двигателей на основе интеллектуального анализа данных [Текст] / В. И. Васильев, С. В. Жернаков // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2006. – № 2 (17). – С. 45–56.
8. Преображенский, Л. А. Метод прогнозирования технического состояния цифрового бортового оборудования летательного аппарата [Текст] / Л. А. Преображенский, Л. Г. Процкая // Международный журнал прикладных наук и технологий «Интеграл». – 2022. – № 3. – С. 12–24.
9. Жернаков, С. В. Алгоритмы контроля и диагностики авиационного ГТД в условиях бортовой реализации на основе технологии нейронных сетей [Текст] / С. В. Жернаков // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 4. – С. 78–89.
10. Грибов, В. М. Статистическая оценка точности метода квантилей при информационной поддержке эксплуатации авионики [Текст] / В. М. Грибов, П. В. Стрельников // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 228 (6). – С. 112–119.
11. Довгалюк, И. В. Исследование методов прогнозирования отказов и дефектов авиационного оборудования с применением алгоритмов машинного обучения [Текст] : дис. канд. техн. наук / И. В. Довгалюк. – Екатеринбург : УрФУ, 2025. – 187 с

Белая М.Н.
к.т.н., доцент кафедры «Техносферная безопасность»
Севастопольский государственный университет
Россия, Севастополь
belaya_079@mail.ru
Гаврисенко С.Л.
аспирант
Севастопольский государственный университет
Россия, Севастополь
slgavrisenko@mail.sevsu.ru

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННО-ОПАСНОГО ОБЪЕКТА НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ ИСИКАВЫ

Аннотация. в статье представлен причинно-следственный анализ влияния радиационно-опасного объекта на экологическую безопасность с использованием диаграммы Исикавы. По результатам причинно-следственного анализа определены главные причины: персонал и культура безопасности, оборудование и инфраструктура, процессы, контроль и мониторинг, организация труда и управление, внешняя среда и население. Определены группы возможных воздействий и аспектов: почва, атмосфера, гидросфера, твёрдые коммунальные отходы, растительный и животный мир, персонал и население. Для определения значимости показателей по конкретным группам воздействия установлены показатели оценки экологических аспектов деятельности радиационно-опасных объектов: вероятность проявления (частота возникновения), степень опасности экологического аспекта (мощность, продолжительность, масштаб воздействия), возможность устранения (затраты сил и средств на ликвидацию последствий), документально зафиксированное воздействие экологического аспекта в следствии нарушения требований эксплуатации и законодательства. На основании полученных результатов причинно-следственного анализа и учитывая показатели оценки экологических аспектов деятельности радиационно-опасных объектов проведено ранжирование экологических аспектов с определением их значимости. Для получения обобщенной информации разработан реестр экологических аспектов радиационно-опасного объекта города Севастополя. По факту реализации мероприятий определены возможности по их улучшению.

Ключевые слова: диаграмма Исикавы, радиационно-опасные объекты, система экологического менеджмента, экологические аспекты, экологическая безопасность.

Belaya M.N.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Technosphere Safety
Sevastopol State University
Sevastopol, Russia
belaya_079@mail.ru
Gavrisenko S.L.
Postgraduate Student
Sevastopol State University,
Russia, Sevastopol
slgavrisenko@mail.sevsu.ru

CAUSAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF A RADIATION-HAZARDOUS OBJECT ON ENVIRONMENTAL SAFETY USING THE ISCAVA DIAGRAM

Abstract. The article presents a cause-and-effect analysis of the impact of a radiation-hazardous facility on environmental safety using an Ishikawa diagram. Based on the results of the cause-and-effect analysis, the main causes were identified: personnel and safety culture, equipment and infrastructure, processes, control and monitoring, labour organization and management, the external environment, and the population. Groups of possible impacts and aspects were identified: soil, atmosphere, hydrosphere, solid municipal waste, flora and fauna, personnel, and the population. To determine the significance of indicators for specific exposure groups, the following indicators are used to assess the environmental aspects of radiation-hazardous facilities: the likelihood of occurrence (frequency), the degree of environmental hazard (intensity, duration, and scale of exposure), the possibility of elimination (efforts and resources required to eliminate the consequences), and the documented impact of environmental aspects resulting from violations of operational requirements and legislation. Based on the results of the causal analysis and taking into account the indicators of the assessment of the environmental aspects of the activities of radiation-hazardous facilities, the ranking of environmental aspects was carried out to determine their significance. To obtain generalized information, a register of environmental aspects of the radiation-hazardous facility in the city of Sevastopol was developed. Based on the implementation of measures, opportunities for their improvement were identified.

Keywords: Ishikawa diagram, radiation-hazardous facilities, environmental management system, environmental aspects, environmental safety.

Деятельность предприятий, эксплуатирующих опасные-производственные объекты и радиационно-опасные объекты, связана с повышенными рисками воздействия на человека и окружающую среду. Поэтому в системе управления данными организациями должны использоваться методы для анализа и формализации процессов, осуществляемых в организации. Одним из важнейших направлений является стратегический анализ функционирования предприятия в экологическом аспекте его деятельности.

Данный анализ целесообразно осуществлять с применением качественных методов, направленных на понимание смысла процессов, протекающих в организации, их интерпретацию и логику, при этом количественные вычисления и характеристики являются лишь небольшой частью данного процесса и несут в себе как правило аспект ранжирования и определения значимости выявленных качественных характеристик.

В основе рассматриваемого вида анализа находится процесс сбора данных через понимание условий и возможности воздействия того или иного элемента на процесс принятия решений или конечный результат. К основным методам сбора данных относят экспертные оценки (метод ранжирования, метод парных сравнений), мозговой штурм (прямой, обратный), SWOT-анализ, Дельфи-метод. Комплекс этих методов является основой для совершенствования деятельности организации и внедрения новых технологий и процессов.

Для графической интерпретации использования данных методов для определения причинно-следственных связей часто используют диаграмму Исикавы. Диаграмма Исикавы (также называемая «рыбий скелет» или «диаграмма причинно-следственных связей») является причинно-следственной диаграммой, которая показывает основные причины конкретного события [1].

Данный метод ввел в научную практику японский теоретик менеджмента профессор Каору Исикава в 1982 году. Этот метод оказался очень полезным и применялся во многих компаниях Японии и получил название диаграммы Исикавы.

Данная диаграмма на сегодняшний день применяется по всему миру и является одним из инструментов контроля качества. Вышеуказанная причинно-следственная диаграмма позволяет точно отделять причины от следствий, а также указывает на причину определенного события для целостной оценки проблемы. Полезность диаграммы для научных исследований и для обоснования принятия качественных управленческих решений характеризуется в наглядной структуризации большого количества потенциально возможных причин с выявлением наиболее вероятной причины рассматриваемого следствия.

Типовая структура диаграммы Исикавы представлена на рисунке 1.

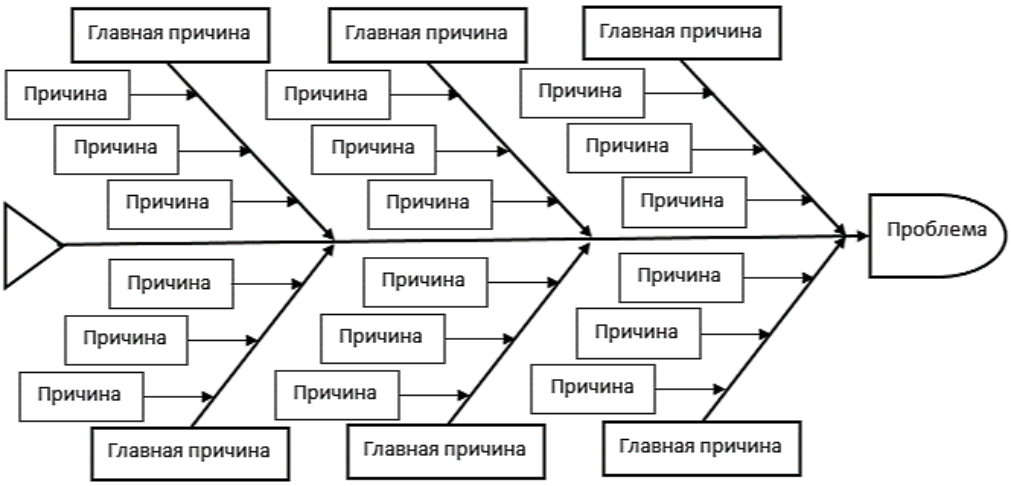


Рис. 1. Типовая структура диаграммы Исикавы

Диаграмма состоит из трех главных частей: голова рыбы (главная проблема, требующая решения), крупные кости (причины, влияющие на проявление главной проблемы), малые кости (детальные факторы причин).

Главной задачей анализа с применением причинно-следственной диаграммы является определение причин проблемы.

Таким образом объектом исследования является проблема или искомый результат.

К основным областям применения диаграммы Исикавы относят структурирование и анализ процессов в организации, анализ соотношения причинно-следственных связей всестороннего и систематизированного определения источников возникновения проблемы.

Этапы составления диаграммы Исикавы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Этапы составления диаграммы

№ этапа	Наименование этапа	Описание
Этап №1	Формулировка проблемы	Необходимо четко определить проблемы и задачи, которые необходимо решить
Этап №2	Определение факторов причин	Профессор Исикава рекомендует учитывать 6 факторов проявления проблемы (6M): 1. Man – все, кто участвует в процессе. 2. Machine – оборудование и техника, которые нужны для работы. 3. Material – материалы, которые используют в работе. 4. Method – инструкции и технологии, которые используют люди в работе. 5. Measurement – метрики работы команды. 6. Mother Nature – внешние факторы. Каждая категория факторов представляет собой крупную кость на диаграмме. Есть два варианта работы с факторами: использовать классический 6M или ввести свои факторы, можно выбрать любые параметры для структурирования причин проблемы, главное, чтобы они были логичны и располагались в последовательности от общего к частному, т.е. сначала необходимо выбрать большую категорию причин, а дальше в ней найти детализированные причины.
Этап №3	Углубление факторов причин	Необходимо после выявления верхнеуровневых факторов найти первопричины. На этом этапе необходимо использовать классические методы качественного анализа, основными из которых является мозговой штурм и ранжирование по категориям.
Этап №4	Планирование решения	После сбора факторов по «узкой кости», их нужно выписать и проанализировать. После сбора всех возможных причин выбираются и прорабатываются наиболее вероятные. Если таковых будет много рекомендуется выбрать две-три наиболее вероятные причины и поработать с ними.

Реализация описанных выше этапов позволяет оценить весь комплекс причинно-следственных связей и проблем на пути достижения целей организации и повышения эффективности ее функционирования. Преимущества использования диаграммы Исикавы для организации [2]:

- фокус на содержании проблемы;
- наглядное отражение взаимосвязи между причинами возникновения проблемы;
- визуально легко воспринимаемая информация;
- визуальное распределение причин по группам;
- база для мозгового штурма на предмет изучения первопричины образования проблемы.

Данные преимущества позволяют уверенно сказать о том, что данный метод необходимо применять для целей оценки и обоснования воздействия

на окружающую среду. Он позволяет выделить причинно-следственные связи при антропогенном воздействии организации на компоненты природной среды.

Главной целью применение данного метода в этом аспекте является повышение качества системы экологического менеджмента согласно стандарта ГОСТ Р ИСО 1400, который рекомендует организациям подход для защиты окружающей и природной среды и реагирования на изменяющиеся экологические условия в балансе с социально-экономическим потребностями [3].

Внедрение системы экологического менеджмента требует применение процессного подхода, направленного на комплексный анализ каждого процесса, протекающего в организации для постоянного улучшения экологической эффективности. Для этого необходимо строить причинно-следственные модели для каждого этапа разработки системы экологического менеджмента в организации, в том числе на радиационно-опасных объектах.

Радиационно-опасные объекты, как объекты, на которых хранятся или используются источники ионизирующего излучения, являются организациями, которые в своей деятельности могут воздействовать и воздействуют на окружающую среду.

Система экологического менеджмента для таких организаций должна включать комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на минимизацию неблагоприятного воздействия на персонал и окружающую среду как в режиме повседневной деятельности, так и в условиях аварий и инцидентов. Это обусловлено наличием запроса общества на безопасные экологические условия, что требует выработки и декларирования единых требований к экологической и радиационной безопасности на радиационно-опасном объекте.

Данная задача решается путем стратегического планирования деятельности организации через внедрение соответствующих программ и принятия необходимых локальных нормативно-правовых актов для каждого этапа разработки системы экологического менеджмента на радиационно-опасном объекте. Алгоритм разработки системы экологического менеджмента включает в себя ряд этапов, представленных на рисунке 2.

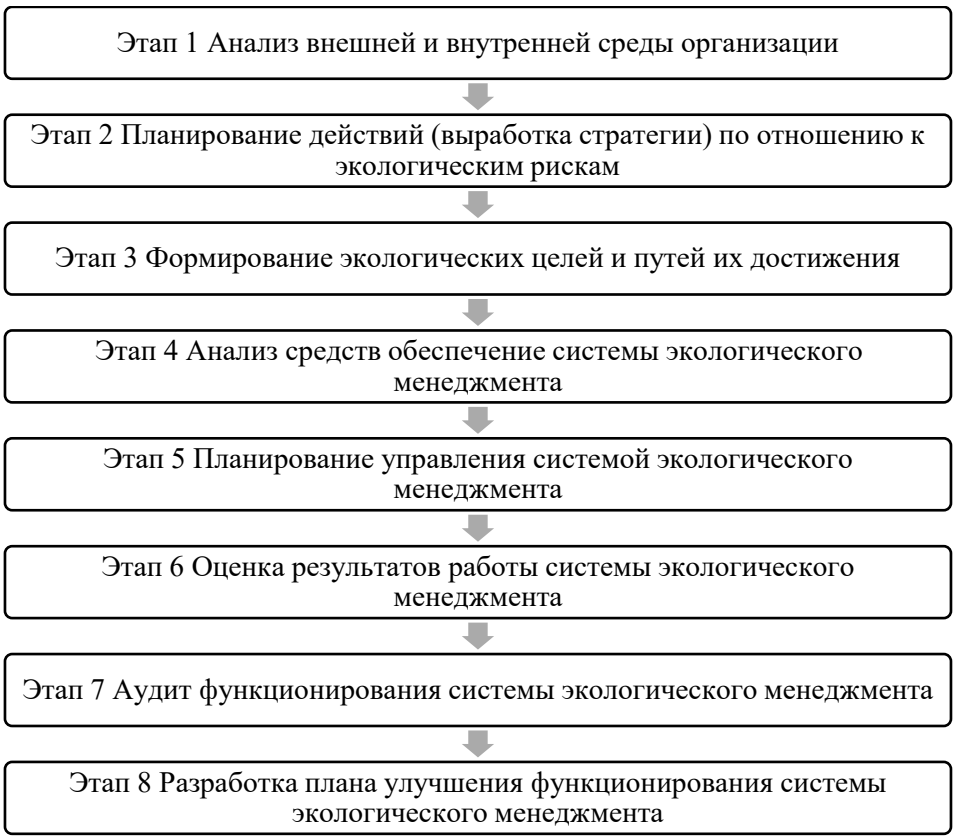


Рис. 2. Алгоритм разработки системы экологического менеджмента

На наш взгляд использование диаграммы Исикавы является важнейшей частью методологии планирования действий (выработки стратегии) по отношению к экологическим рискам через анализ влияния на экологическую и радиационную безопасность.

Применять данную диаграмму можно при стратегическом планировании экологической эффективности радиационно-опасного объекта на всех стадиях его жизненного цикла.

К основным этапам жизненного цикла рассматриваемых объектов относят: проектирование, сооружение, эксплуатация, вывод из эксплуатации.

Эксплуатационный этап включает в себя режим пуска, режим работы на мощности, режим временного останова, режим длительного останова, режим окончательного останова.

В этом исследовании нами была построена диаграмма Исикавы для режима длительного останова, так как работа в данном режиме имеет свою специфику оценки воздействия деятельности предприятий, эксплуатирующие ядерные установки на персонал и окружающую природную среду.

Главной спецификой данного режима является неопределенность будущего сценария развития объекта, отработавший свой назначенный срок эксплуатации, что требует повышенного внимания к техническому состоянию и режимам организации повседневной деятельности и поддержания «живучести» до модернизации либо режима окончательного останова и как следствие вывода из эксплуатации.

Мы поставили перед собой задачу выявления влияния возможных значимых негативных факторов на экологическую и радиационную безопасность объекта.

Наша концепция в своей основе включает в себя рекомендации профессора Каору Исикавы называемые 6М, но со спецификой проведения углублённого анализа, а не стремление к реализации управляющих воздействий.

В структуре причинно-следственной диаграммы нами были выделены главные причины влияния, а именно: действия персонала и недостаточный уровень культуры безопасности, оборудование и инфраструктура, технологические процессы, контроль и мониторинг, организация и управление труда, воздействие внешней среды. Проанализировав главные причины, мы выделили группы причин первого порядка.

Применение такого инструмента системного анализа помогает выявить потенциальные «уязвимые места» и рационально распределять ресурсы организации на устранение возможных проблем и общее улучшение экологической и радиационной безопасности.

Данная наглядная диаграмма позволит эксперту и руководству организации увидеть, что повлияло на ситуацию и определить последующие действия повышения экологической ситуации. Очень часто рассматривая диаграмму первым из всех ключевых факторов является «Персонал и культура безопасности», так как именно здесь кроются самые частые причины проблем, поскольку до 80% всех инцидентов и аварий связаны с человеческим фактором.

Для качественного уменьшения влияния человеческого фактора важно повышать уровень образованности, культуры безопасности и экологического сознания персонала организации. Это особенно важно тогда, когда оборудование эксплуатируется уже много лет и повышается вероятность отказов и поломок.

При ремонтных работах можно пойти по пути качества и применения экологически ориентированных технологий, либо действовать, не обращая внимания на последствия, используя при этом устаревшие подходы.

Еще одним значимым фактором влияния на экологическую и радиационную безопасность является «Оборудование и инфраструктура». Устаревшие технологии и системы не позволяют качественно соответствовать современным требованиям, выдвигаемым к подобным объектам.

Отсутствие необходимых комплектующих может привести к использованию сомнительных аналогов, понижающих вероятность безотказной работы и повышения рисков экологического характера.

Так же важно обратить внимание на «Процессы», протекающие на объекте в соответствующем режиме. Данные процессы могу как улучшать, так и негативно воздействовать на нее. К не благоприятным процессам можно отнести: ошибки в процессе обращения с радиоактивными отходами, ошибки проведения инвентаризации радиоактивных отходов и ядерных материалов, ошибки в процессе обращения с отработанным ядерным топливом и т.п.

За данными процессами необходимо организовывать «Контроль и мониторинг», однако и здесь могут быть выявлены проблемы связанные со снижением эффективности данного процесса.

К основным таким проблемам можно отнести: недостаточная автоматизация мониторинговых систем, отсутствие система раннего обнаружения протечек, ошибки при оценке воздействия на окружающую среду, а также ошибки ведения дозиметрического контроля доз персонала, но ключевой проблемой может быть отсутствие информационных систем накопления и анализа полученных данных о воздействия на окружающую среду и персонал.

Проблемы в «Охране труда и управлении» могут быть связаны с ошибками в документах, нарушении регламентов, инструкций, требований экологической безопасности, а также слабая организация взаимодействия подразделений.

Еще одним значимым фактором является «Внешняя среда», способная через воздействия природных стихийных бедствий и техногенных чрезвычайных ситуаций привести к резкому ухудшению экологической и радиационной обстановке.

Графическая интерпретация влияния на экологическую и радиационную безопасность радиационно-опасного объекта по методу диаграммы Исикавы представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Диаграмма Исикавы: влияние на экологическую и радиационную безопасность радиационно-опасного объекта

Применение причинно-следственной диаграммы Исикавы повышает эффективность принятия управленческих решений в области экологической безопасности и стратегического планирования минимизации воздействия на окружающую среду. Эти управленческие решения, как правило, принимаются в структуре системы экологического менеджмента.

Данная система должна быть органичной частью системы менеджмента качества в организации.

Для создания системы экологического менеджмента необходимо выделить комплекс экологических аспектов, как элемента деятельности организации, который взаимодействует или может взаимодействовать с окружающей средой, которая включает в себя воздух, воду, землю, природные ресурсы, флору, фауну, людей и их взаимоотношение, согласно ГОСТ Р ИСО 14001-2016 [4].

Выявление экологических аспектов через анализ причинно-следственных связей диаграммы необходимо для установления того, где необходимо соответствующее управление или улучшение, а также для установления приоритетов для действий по управлению основанных главным образом экологических факторах [5].

Идентификация экологических аспектов осуществляется для создания системы экологического менеджмента и проводится для определения экологических рисков воздействия на окружающую среду персонал и население.

В нашей работе мы рассмотрим экологические аспекты воздействия на примере радиационно-опасного объекта города Севастополя находящегося в режиме длительного останова.

Деятельность объекта в таком режиме не исключает воздействие на окружающую среду, а требует анализа исходя их условий работы и аспектов работы. Нами были выделены группы возможных воздействий и аспектов, включенные в них таких как:

Почва (пролив горюче-смазочных материалов (ГСМ), пролив радиоактивных отходов (РАО), образование твердых коммунальных отходов (ТКО));

Атмосфера (выбросы от работы дизельного генератора (ДГ), выбросы от работы специальной вентиляции);

Гидросфера (образование стоков);

Твёрдые коммунальные отходы (образование отходов производства и потребления);

Растительный и животный мир (антропогенное воздействие на флору и фауну);

Персонал и население (аварии с выбросом радиоактивных веществ).

Каждый экологический аспект связан со своими особенностями воздействия и рисками. При проведении оценки экологических аспектов необходимо составить реестра экологических аспектов, как элемента системы

экологического менеджмента, что позволит наглядно оценить важность экологических аспектов и выделить те, которые наиболее могут принести ущерб.

Также очень важно в данном реестре определить значимость показателя по конкретным группам воздействия. Для целей нашего исследования мы выделили такие показатели, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Показатели оценки экологических аспектов деятельности РОО

Показатель	Описание	Значение показателя	
К1	Вероятность проявления (частота возникновения)	1	низкая
		2	средняя
		3	высокая
К2	Степень опасности ЭА (мощность, продолжительность, масштаб воздействия)	1	мало опасно
		2	умеренно опасно
		3	чрезвычайно опасно
К3	Возможность устранения (затраты сил и средств на ликвидацию последствий)	1	устраняется собственными силами без использования специальных средств
		2	устраняется собственными силами с применением специальных средств
		3	требуется привлечение специализированных сторонних организаций
К4	Документально зафиксированное воздействие экологического аспекта в следствии нарушения требований эксплуатации и законодательства	1	воздействие не зафиксировано
		2	зафиксировано нарушение требований эксплуатации
		3	зафиксировано нарушение требований законодательства

Ранжирование экологических аспектов с определением значимости осуществляется по набранным баллам: К = К1 × К2 × К3 × К4, где присвоим значимость:

- от 0 до 4 – незначимый,
- от 4 до 16 – малозначимый,
- 17 и более – значимый.

Реестр экологических аспектов представляет из себя таблицу с определением значимости каждого. Реестр экологических аспектов – это не просто перечень, это результат углубленного комплексного анализа деятельности объекта в целом. При анализе которого оценивается все взаимодействия радиационно-опасного объекта с окружающей средой и выделением среди них самых важных, самых приоритетных для дальнейшего контроля и удаления им особого внимания.

Значимость аспекта необходимо определять методом экспертных оценок через методы качественного анализа. Хорошо пользоваться таким методом, как «действие-аспект-воздействие», который помогает установить при-

чинно-следственную связь между деятельностью объекта и его последствиями, и воздействиями на окружающую среду, и как следствие понять серьезность последствий.

Реестр экологических аспектов рассматриваемого радиационно-опасного объекта представлен в таблице 3.

Таблица 3

Реестр экологических аспектов радиационно-опасного объекта города Севастополя

№ п/п	Экологический аспект	Воздействие на окружающую среду	Риски относящиеся к воздействию	Оценка значимости экологического аспекта					Значимость аспекта
				К1	К2	К3	К4	К=К1×К2×К3×К4	
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Почва									
1	Пролив ГСМ	Образование площади разлива, проникновение в глубину грунта	Превышение ПДК углеводородов в почве	2	1	2	1	4	малозначимый
2	Пролив РАО	Образование площади разлива, проникновение в глубину грунта	Образование площади радиоактивного загрязнения. Повышение параметров активности радионуклидов в почве	2	3	2	2	24	значимый
3	Образование ТКО	Повышение уровня захламленности территории РОО	Образование территории с избыточным количеством мусора (захламление земель)	1	1	1	1	1	незначимый
Атмосфера									
4	Выбросы от работы дизельного генератора	Загрязнение приземного слоя воздуха химическими веществами и соединениями	Повышенные значения концентрации химических загрязнителей атмосферы в непосредственной близости от источника	2	1	2	1	4	малозначимый
5	Выбросы от работы специальной вентиляции	Ионизация атмосферного образование Аргона-40, выбросы радиоактивных газов и аэрозолей.	Превышение значений объёмной активности воздуха при работе специальной вентиляции	1	2	1	1	2	незначимый

Окончание табл. 3

Реестр экологических аспектов радиационно-опасного объекта города Севастополя

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Гидросфера									
6	Образование стоков	Повышение объёмной активности ливневых стоков	Риски загрязнения ливневых стоков РВ при авариях на РОО и попадания их в ливневую канализацию города	1	1	1	1	3	незначимый
Твёрдые коммунальные отходы									
7	Образование отходов производства и потребления	Захламление территории	Складирование отходов на полигоне ТКО с последующим воздействием на природную среду	1	1	1	1	1	незначимый
Растительный и животный мир									
8	Антропогенное воздействие на флору и фауну	Уменьшение ареалов распространения видов	Воздействие на растительный и животный мир в результате аварий и инцидентов	1	2	2	1	4	незначимый
Персонал и население									
9	Аварии с выбросом радиоактивных веществ	В режиме повседневной деятельности неблагоприятного воздействия на население не возникает	Риски облучения персонала и населения	2	3	3	1	18	значимый

Также для повышения эффективности функционирования системы экологического менеджмента важно выделить мероприятия по управлению аспектами и снижению рисков.

Данные мероприятий должны организовываться согласно с планами и процессным подходов с учетом цикла Деминга.

По факту реализации мероприятий необходимо проанализировать возможности по их улучшению.

Перечень возможностей и мероприятий по управлению экологическим аспектами представлен в таблице 4.

Таблица 4

Сводная таблица возможностей и мероприятий по управлению экологическими аспектами на радиационно-опасном объекте

1	*2*	*3*	*4*
Почва			
1	Пролив ГСМ	Наличие соответствующих специализированных мест хранения ГСМ. Наличие средств локализации при розливе.	Использование технически исправного оборудования, применение специальных лотков, емкостей, поддонов и т.п. средств при обращении с технологическими материалами
2	Пролив РАО	Использование средств деактивации. Проведение организационных и технических мероприятий по повышению качества процесса обращения с отходами. Проведение радиационного контроля для оценки состояния почвенного покрова.	Соблюдение правил безопасного обращения с вторичными радиоактивными отходами проведение радиационного контроля для оценки состояния почвенного покрова.
3	Образование ТКО	Организация специализированных мест размещения ТКО с раздельным сбором мусора.	Выполнение нормативных требований по обращению с образующимися отходами. Накопление отходов необходимо производить в специальные контейнеры с целью недопущения захламления производственных участков и содержания территории в надлежащем санитарном состоянии. Накопление отходов осуществляется в условиях, исключающих загрязнение окружающей среды. Твердые коммунальные отходы должны регулярно вывозиться на полигон, включенный в Государственный реестр объектов размещения отходов
Атмосфера			
4	Выбросы от работы дизельного генератора	Возможность организации контроля за уровнем химического загрязнения атмосферного воздуха. Проведение мероприятий по охране атмосферного воздуха. Поддержание в исправном состоянии выхлопных систем спецтехники.	Своевременное проведение планового периодического осмотра и планового ремонта используемого оборудования и техники. Проведения ежегодного технического осмотра и ремонта усиление контроля за точным соблюдением технологического регламента
5	Выбросы от работы специальной вентиляции	Возможность организации радиометрического контроля за уровнем загрязнения атмосферного воздуха радиоактивными веществами. Осуществление технического обслуживания специальной вентиляции. Замена фильтров и комплектующих.	Своевременное проведение планового периодического осмотра и планового ремонта используемого оборудования и техники проведения ежегодного технического осмотра и ремонта усиление контроля за точным соблюдением технологического регламента

Продолжение табл. 4

1	*2*	*3*	*4*
Гидросфера			
6	Образование стоков	Обеспечение готовности в любое время принять меры по ликвидации аварии	Сброс сточных вод в водные объекты отсутствует, поэтому предусмотренные проектные решения позволяют предотвратить и минимизировать воздействие на водные ресурсы. Прямые сбросы сточных вод, содержащих радионуклиды, в открытую гидрографическую сеть, отсутствуют.
Твёрдые коммунальные отходы			
7	Образование отходов производства и потребления	Регулярный вывоз отходов специальной техникой. Наличие принятого порядка по обращению с отходами. Соблюдение норм накопления отходов. Организация контейнерных площадок для сбора ТКО. Организация селективного сбора отходов, подлежащих вывозу на вторичную переработку и размещение	Соблюдение требований, правил и норм, установленных законодательством Российской Федерации в области обращения с отходами. Организация надлежащего учета отходов. Организация мест размещения отходов в соответствии с требованиями нормативно-технических и санитарных документов. Своевременный вывоз отходов в установленные места. Безопасные условия транспортирования отходов. Соблюдение экологических и санитарных требований при временном хранении отходов.
Растительный и животный мир			
8	Антропогенное воздействие на флору и фауну	Проведение мероприятий по информированию работников об особенностях возможного воздействия на растительный и животный мир. Проведение производственного контроля и мониторинга состояния компонентов природной среды, по возможности расширив программу	Минимизация воздействия на растительный покров обеспечивается: движением автотранспорта только по установленным автодорогам; поддержанием в рабочем состоянии всех водопропускных и водоотводящих сооружений во избежание подтопления и заболачивания, прилегающих территории; выполнением нормативных требований по обращению с образующимися отходами; запрет сбросов всех видов сточных вод на рельеф; соблюдением правил пожарной безопасности. Минимизация воздействия на животный мир обеспечивается: мероприятиями по охране атмосферного воздуха; движением автотранспорта и техники только по установленным автодорогам; поддержанием в рабочем состоянии всех водопропускных и водоотводящих сооружений во избежание подтопления и заболачивания, прилегающих территории; освещением площадок и сооружений объектов; соблюдением правил пожарной безопасности; осуществление всех видов работ, только обученным и квалифицированным персоналом.

Окончание табл. 4

1	*2*	*3*	*4*
Персонал и население			
9	Аварии с выбросом радиоактивных веществ	Ядерные установки имеют систему физических барьеров, препятствующих распространению ионизирующего излучения радиоактивных веществ в окружающую среду.	Размещение участка на существующей промплощадке с установленной санитарно-защитной зоной. Зональным разделением производственных помещений. Обеспечение требуемого качества систем и элементов, важных для безопасности РВ. Обеспечение диагностики оборудования и систем, важных для безопасности РВ. Поддержание в исправном состоянии систем и элементов, важных для безопасности РВ, путем своевременного определения дефектов, принятия профилактических мер, замены выработавшего ресурс оборудования и организации эффективно действующей системы документирования результатов работ и контроля. Подбор и обеспечение необходимого уровня квалификации персонала; Дезактивация загрязненного оборудования. Организация радиационного контроля.

Таким образом, применение причинно-следственной диаграммы Исикавы в сочетании с методами качественного анализа является важной основой методологии создания системы экологического менеджмента и повышения качества управления воздействием на окружающую среду.

Диаграмма Исикавы помогает провести многоуровневый анализ деятельности объекта, изучить все процессы в нем, выявить экологические аспекты, как следствие создать документ, определяющий дальнейшую стратегию мероприятий радиационно-опасного объекта.

Список литературы

1. Анализ и применение метода диаграмма Исикавы / А. Казанцева, О. Казанцева, Е. Козырева, Д. Федорова // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научно-практической конференции, Курск, 14 ноября 2018 года. Том 1. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2018. – С. 253–256.

2. Бадриева, А. Ф. Рекламации. Инструменты качества. Диаграмма Исикавы / А. Ф. Бадриева // Всероссийская научно-практическая конференция Студентов, магистрантов, Аспирантов и молодых ученых «XV КАМСКИЕ ЧТЕНИЯ» : Сборник докладов, Набережные Челны, 27 октября 2023 года. – Набережные Челны: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2024. – С. 7–9.

3. Гаврисенко, С. Л. Анализ современных подходов к разработке и внедрению системы экологического менеджмента на радиационно-опасных объектах / С. Л. Гаврисенко, М. Н. Белая // Современные технологии: проблемы и перспективы : сборник статей всероссийской научно-практической конференции для Аспирантов, Студентов и молодых учёных,

Севастополь, 14–17 апреля 2025 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2025. – С. 240–243.

4. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО 14001-2016 Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 апреля 2016 г. №258-ст).

5. Качалов, В. А. Системы экологического менеджмента по ISO 14001: вопрос об экологических аспектах / В. А. Качалов // Методы менеджмента качества. – 2018. – № 1. – С. 22–19.

Уразов В.В.
аспирант
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва
Россия, Рыбинск
Bfvova@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ИНЖЕНЕРНЫМИ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ В СМК ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы взаимодействия между инженерными и производственными подразделениями в системе менеджмента качества (СМК) предприятий приборостроения. Актуальность обусловлена высокой сложностью продукции, жёсткими требованиями к точности и надёжности, а также необходимостью интеграции процессного подхода в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Выявлены семь типовых проблем, включая недостаточную проработанность конструкторской документации, частые изменения КД, нарушение технологической дисциплины, дефицит квалификации персонала, перегрузку конструкторов производственным сопровождением, размытие ответственности и конфликт сроков с качеством. Проведена систематизация проблем в три группы: организационно-управленческие, информационно-документационные и производственно-технологические. Показано, что корневой причиной большинства нарушений выступают организационно-управленческие недостатки, которые порождают сбои информационного обмена и приводят к технологическим несоответствиям. Построена структурная схема причинно-следственных связей. Предложена модель повышения эффективности взаимодействия подразделений в СМК, направленная на регламентацию ответственности, развитие обратной связи и улучшение информационного обмена. Полученные результаты могут служить основой для повышения результативности СМК и конкурентоспособности приборостроительных предприятий.

Ключевые слова: система менеджмента качества, приборостроение, инженерные подразделения, производственные подразделения, конструкторская документация, технологическая дисциплина, организационно-управленческие проблемы, процессный подход.

Urazov V.V.
Postgraduate Student
Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov
Russia, Rybinsk
Bfvova@gmail.com

PROBLEMS OF INTERACTION BETWEEN ENGINEERING AND PRODUCTION DIVISIONS IN THE QMS OF INSTRUMENT-MAKING ENTERPRISES

Abstract. The article examines the problems of interaction between engineering and production divisions within the quality management system (QMS) of instrument-making enterprises. The relevance is determined by the high complexity of products, stringent requirements for accuracy and reliability, as well as the need to integrate the process approach in accordance with GOST R ISO 9001-2015. Seven typical problems are identified, including insufficient elaboration of design documentation, frequent changes to design documentation, violation of technological discipline, lack of personnel qualifications, overload of designers with production support, diffusion of responsibility, and the conflict between deadlines and quality. The problems are systematized into three groups: organizational and managerial, informational and documentary, and production and technological. It is shown that the root cause of most disturbances is organizational and managerial shortcomings, which lead to failures in information exchange and result in technological inconsistencies. A structural diagram of cause-and-effect relationships is constructed. A model for improving the efficiency of interaction between divisions within the QMS is proposed, aimed at regulating responsibility, developing feedback, and improving information exchange. The obtained results can serve as a basis for enhancing the effectiveness of the QMS and the competitiveness of instrument-making enterprises.

Keywords: quality management system, instrument making, engineering divisions, production divisions, interaction, design documentation, technological discipline, organizational and managerial problems, process approach.

Современный этап развития промышленности характеризуется усложнением продукции, внедрением цифровых технологий и усилением требований к качеству выпускаемых изделий. Особенно это актуально для предприятий приборостроения, где высокая точность, надежность и соответствие нормативным требованиям являются критическими факторами конкурентоспособности. В этих условиях ключевую роль приобретает система менеджмента качества, основанная на принципах стандартов серии ГОСТ Р ИСО 9000 [1, 2].

В соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015, деятельность организации должна рассматриваться как совокупность взаимосвязанных процессов, управление которыми обеспечивает достижение запланированных результатов. При этом особое значение имеет установление и поддержание эффективного взаимодействия между процессами и подразделениями предприятия. Следует отметить, что одной из распространённых проблем внедрения СМК – является формальный характер описания процессов, при котором система слабо интегрируется в реальное управление организацией и не обеспечивает должного уровня взаимодействия между участниками процессов [3].

Перечислим основные проблемы взаимодействия между инженерными и производственными подразделениями в СМК:

– недостаточная проработанность КД от заказчика;

– частые изменения КД в процессе производства;

– нарушение технологической дисциплины;
– недостаточный уровень квалификации производственного персонала;
– перегрузка конструкторов производственным сопровождением;
– размытие ответственности между подразделениями;
– конфликт сроков и качества.

С целью структурирования выявленных проблем и последующего анализа их причинно-следственных связей в рамках системы менеджмента качества, ниже представлена сводная таблица.

Таблица

Сводная таблица основных проблем взаимодействия между инженерными и производственными подразделениями в СМК

Проблема	Проявление проблемы на практике	Причины возникновения	Последствия для СМК
Недостаточная проработанность КД от заказчика	Наличие ошибок, противоречий и неполных данных в КД; необходимость дополнительной инженерной проработки перед запуском производства	Недостаточный уровень предварительной проработки со стороны заказчика; отсутствие единых требований к структуре и полноте КД	Увеличение сроков подготовки производства; рост числа согласований и изменений; простои производства; снижение управляемости процессов
Частые изменения КД в процессе производства	Внесение изменений в КД после начала изготовления; необходимость переделки деталей и корректировки технологических процессов	Ошибки в исходной документации; уточнение требований заказчика; недостаточная стабильность инженерных решений	Нарушение стабильности производственного процесса; рост затрат на корректирующие действия; увеличение количества несоответствий
Нарушение технологической дисциплины	Отклонение от требований технологических инструкций и КД; применение неутверждённых методов выполнения операций	Слабый производственный контроль; устоявшиеся неформальные практики; недостаточная культура качества	Снижение воспроизводимости процессов; появление скрытых дефектов; ухудшение качества продукции
Недостаточный уровень квалификации производственного персонала	Ошибки при сборке, монтаже и регулировке изделий; необходимость постоянного вмешательства инженерных служб	Дефицит квалифицированных кадров; недостаточная система обучения и адаптации персонала	Рост уровня брака; увеличение нагрузки на инженерные подразделения; снижение эффективности процессов СМК
Перегрузка конструкторов производственным сопровождением	Регулярное участие конструкторов в решении производственных проблем; постоянное присутствие в цехе; консультирование рабочих	Недостаточная автономность производства; слабая организация технологического сопровождения; недостаточная подготовка персонала	Снижение эффективности инженерной деятельности; перераспределение ресурсов с разработки на сопровождение; увеличение сроков выполнения работ
Размытие ответственности между подразделениями	Конфликты между инженерными и производственными службами при возникновении дефектов; отсутствие единого определения причины несоответствий	Недостаточная регламентация процессов взаимодействия; слабое закрепление ответственности в рамках СМК	Снижение эффективности корректирующих действий; затруднение анализа причин дефектов; ухудшение управляемости СМК
Конфликт сроков и качества	Сокращение времени на контроль и проверки; принятие решений в ущерб качеству при сжатых сроках выполнения работ	Давление сроков со стороны руководства; несогласованность целей подразделений	Формализация процедур контроля качества; рост числа ошибок; снижение надежности продукции

Проведённая систематизация проблем позволяет объединить выявленные проблемы взаимодействия между инженерными и производственными подразделениями в системе менеджмента качества предприятий приборостроения в три основные группы: организационно-управленческие, информационно-документационные и производственно-технологические.

К организационно-управленческой группе относятся:

– размытие ответственности между подразделениями;

– конфликт между требованиями качества и производственными сроками;

– перегрузка конструкторских подразделений задачами производственного сопровождения.

Данная группа проблем охарактеризовывает недостаточную зрелость системы управления взаимодействием, а также отсутствие чётко регламентированных механизмов распределения функций и ответственности в рамках СМК [4, 5].

К информационно-документационной группе относятся:

– недостаточная проработанность конструкторской документации, поступающей от заказчика;

– частые изменения конструкторской документации в процессе производства.

Данные проблемы отражают нарушения в системе информационного обмена между участниками жизненного цикла продукции, а также недостаточную стабильность и актуальность исходных данных, используемых в производственном процессе [5].

К третьей производственно-технологической группе относятся:

– нарушение технологической дисциплины;

– недостаточный уровень квалификации производственного персонала.

Эти факторы, в свою очередь, непосредственно влияют на качество выполнения производственных операций и определяют уровень воспроизводимости технологических процессов [6, 7].

Рассмотренные группы проблем не существуют изолированно, а образуют взаимосвязанную систему. Первопричиной значительной части выявленных нарушений выступают организационно-управленческие недостатки, в частности отсутствие чётко выстроенных механизмов координации и регламентации взаимодействия между подразделениями [4].

Организационные проблемы, в свою очередь, обусловливают нарушения информационного обмена, проявляющиеся в отсутствии единых стандартов передачи и актуализации данных, снижении их достоверности и несвоевременности обновления. Это приводит к формированию технологических несоответствий, которые реализуются уже на стадии производства в виде отклонений от конструкторской документации, необходимости доработок, увеличения количества дефектов и роста производственных затрат [7].

Таким образом, выявленные проблемы образуют причинно-следственную цепочку, оказывающую комплексное влияние на эффективность функционирования системы менеджмента качества предприятий приборостроения.

Для наглядного представления выявленных причинно-следственных связей между проблемами взаимодействия инженерных и производственных подразделений в системе менеджмента качества предприятия приборостроения построена соответствующая структурная схема (рис. 1).

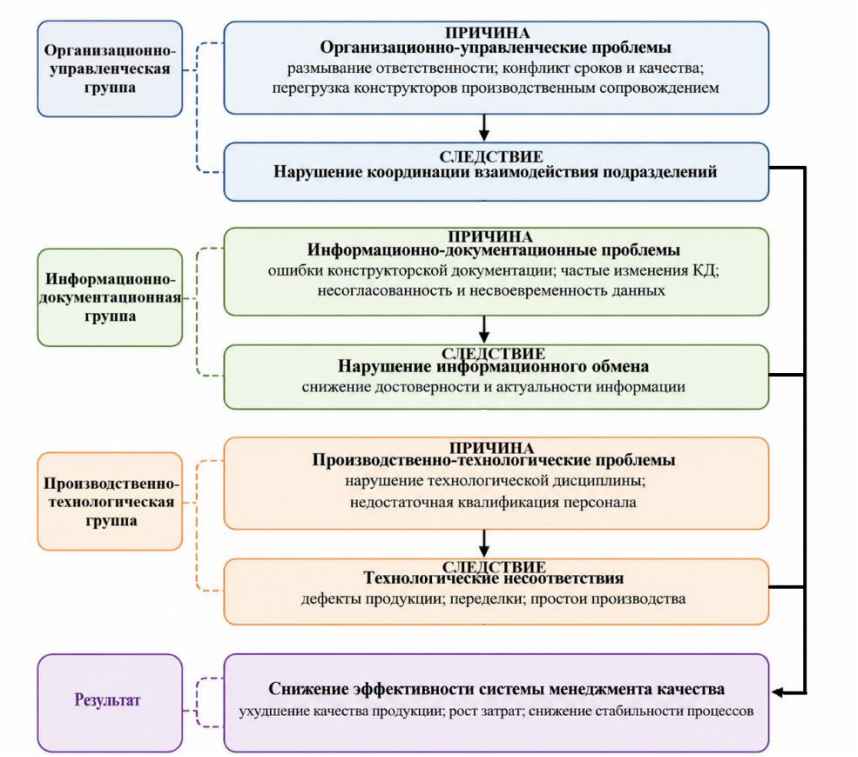


Рис. 1. Схема проблем взаимодействия инженерных и производственных подразделений

Представленная схема демонстрирует последовательное развитие проблем от организационного уровня до производственно-технологических последствий, оказывающих непосредственное влияние на эффективность системы менеджмента качества.

В условиях приборостроения перечисленные проблемы приобретают более выраженный характер. Это обусловлено высокой сложностью продукции, необходимостью точного соблюдения заданных параметров и значительной зависимостью качества от инженерных решений. Даже незначительные отклонения на стадии проектирования или передачи информации могут привести к существенным последствиям на стадии производства. В этой связи возрастает значение согласованности действий между разработчиками и производственными подразделениями [6].

На основе анализа процессов взаимодействия инженерных и производственных подразделений предприятия приборостроения были выявлены типовые проблемы, оказывающие влияние на результативность системы менеджмента качества.

Полученные результаты согласуются с положениями процессного подхода, изложенного в ГОСТ Р ИСО 9001-2015, согласно которому организация должна рассматриваться как совокупность взаимосвязанных процессов, функционирующих в единой системе управления качеством [1]. Аналогичные проблемы межфункционального взаимодействия и недостаточной интеграции процессов системы менеджмента качества рассматриваются в работах В. А. Лапидуса, посвящённых развитию процессного подхода и внедрению принципов TQM на промышленных предприятиях [3].

Проведённый анализ процессов взаимодействия инженерных и производственных подразделений предприятия приборостроения позволил выявить основные группы проблем, оказывающих влияние на результативность системы менеджмента качества. Установлено, что организационно-управленческие, информационно-документационные и производственно-технологические проблемы взаимосвязаны и оказывают комплексное влияние на стабильность производственных процессов и качество продукции.

Полученные результаты показывают необходимость совершенствования механизмов взаимодействия между подразделениями, включая повышение согласованности действий, развитие обратной связи, регламентацию ответственности и улучшение информационного обмена [5, 8].

С учётом выявленных проблем далее будет представлена модель повышения эффективности взаимодействия инженерных и производственных подразделений в рамках системы менеджмента качества предприятия приборостроения (рис. 2).

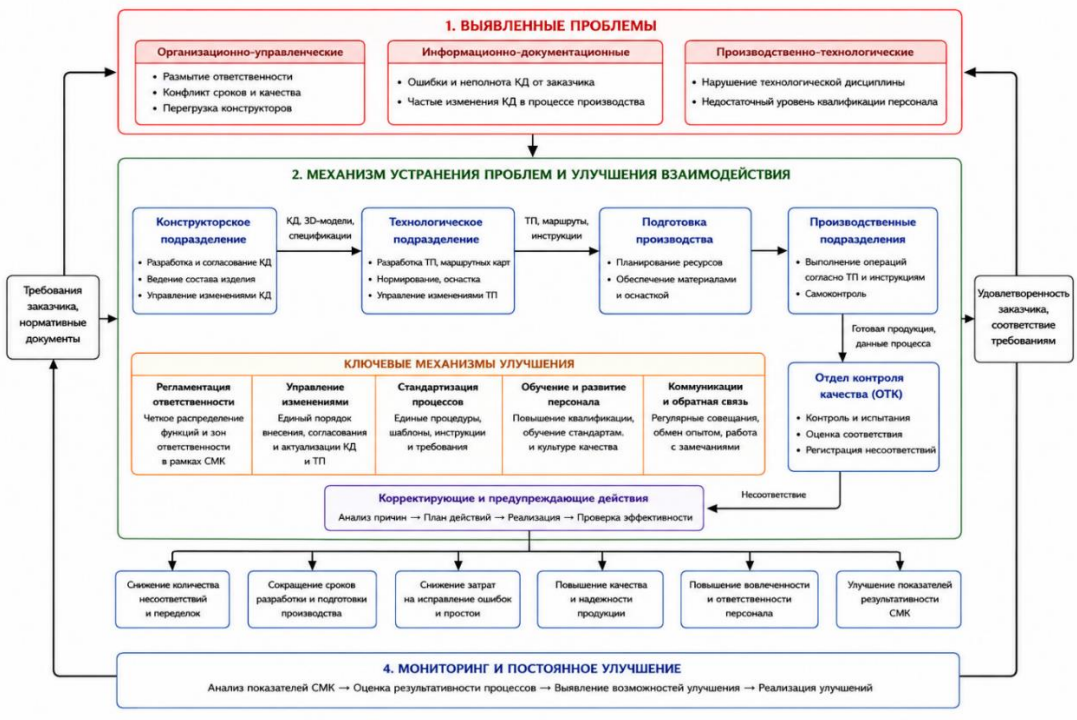


Рис. 2. Модель повышения эффективности взаимодействия инженерных и производственных подразделений в СМК предприятия приборостроения

Такая модель может служить практическим инструментом перехода от фрагментарного устранения сбоев к системному управлению взаимодействием подразделений, создавая основу для устойчивого повышения качества и конкурентоспособности продукции приборостроительного предприятия [8, 9].

Проведённый анализ взаимодействия инженерных и производственных подразделений в СМК предприятий приборостроения позволил выявить семь типовых проблем, которые были систематизированы в три взаимосвязанные группы: организационно-управленческие, информационно-документационные и производственно-технологические. Было установлено, что корневой причиной большинства нарушений выступают организационно-управленческие недостатки, порождающие сбои информационного обмена и ведущие к технологическим несоответствиям. Такой характер проблем формирует устойчивую причинно-следственную цепочку, которая напрямую снижает результативность системы менеджмента качества: увеличивает количество несоответствий, удлиняет производственный цикл и повышает затраты. Полученные результаты обосновывают необходимость комплексных преобразований, направленных на регламентацию ответственности, развитие обратной связи и улучшение информационного взаимодействия. Предложенная в работе модель повышения эффективности взаимодействия задаёт именно такой целостный подход, определяя ключевые направления улучшений.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 32 с.
2. ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 48 с.
3. Лапидус В. А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. – Нижний Новгород : СМЦ «Приоритет», 2000. – 432 с.
4. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – Москва : РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
5. Елиферов В. Г., Репин В. В. Бизнес-процессы: регламентация и управление : учебник. – Москва : ИНФРА-М, 2013. – 319 с.
6. Фатхутдинов Р. А. Производственный менеджмент : учебник. – Санкт-Петербург : Питер, 2011. – 496 с.
7. Окрепилов В. В. Управление качеством : учебник для вузов. – Санкт-Петербург : Наука, 2010. – 912 с.
8. Адлер Ю. П. Качество и рынок, или Как организация настраивается на обеспечение требований потребителей. – Москва : РИА «Стандарты и качество», 2002. – 128 с.
9. Удовиченко А. И., Ищенко И. В. Процессный подход в управлении региональными предприятиями // Современная экономика: проблемы и решения. – 2020. – № 10 (130). – С. 65–78. – URL: https://journals.vsu.ru/meps/article/view/7399 (дата обращения: 04.05.2026).

Асадулин Е.О.
инженер по качеству
ГБУЗ «Кузбасский клинический кардиологический диспансер
имени академика Л.С. Барбараша»
Россия, Кемерово
asadeo@cardio42.ru

РАЗРАБОТКА РИСКОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В КАРДИОЛОГИЧЕСКОМ ДИСПАНСЕРЕ

Аннотация. В статье рассматривается вопрос теории риск-менеджмента, применение научных методологий по анализу и оценке рисков, предложена схема применения научных методологий по управлению рисками, описан опыт разработки рискориентированной модели ГБУЗ «КККД».

Ключевые слова: риск, рискориентированная модель, FMEA-анализ, AMMOP, матрица последствий и вероятностей, процессный подход, система менеджмента качества, кардиологический диспансер.

Asadulin E.O.
Quality engineer
State Budgetary Healthcare Institution «Kuzbass Clinical Cardiology Dispensary
named after academician L.S. Barbarash»
Russia, Kemerovo
asadeo@cardio42.ru

DEVELOPMENT OF A RISK-BASED MODEL FOR PROCESS MANAGEMENT IN A CARDIOLOGICAL DISPENASARY

Abstract. The thesis examines the theory of risk management, the application of scientific methodologies for risk analysis and assessment, proposes a scheme for applying scientific methodologies for risk management, and describes the experience of developing a risk-oriented model SBHI “KCCD”.

Keywords: risk, risk-managment, FMEA, AMMOR consequence-probability matrix, process approach, quality management system, cardiological dispensary.

Управление деятельностью любого учреждения напрямую связано с рисками, влияющими на показатели работы каждого структурного подразделения и каждого сотрудника. Применение современных научно обоснованных подходов в управлении рисками играет одну из важных ролей в развитии учреждения, независимо от отрасли экономики, численности сотрудников, уровня цифровизации и автоматизации процессов.

В научно-методических литературных источниках по теории риск-менеджмента дискуссионно описываются понятия риска: характеристика ситуации, имеющей неопределенность исхода, при обязательном наличии неблагоприятных последствий; вероятность возникновения условий, которые приведут к негативным последствиям; деятельность, связанная с преодоле-

нием неопределенности в ситуации неизбежного выбора, в процессе которой имеется возможность качественно и количественно оценить вероятность достижения предполагаемого результата [1]. В представленных определениях термина прослеживаются схожие взгляды на понимание риска как неблагоприятного последствия, неопределенности.

В ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» приводится в п.3 термин риска: «следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей» [2], где понятие неопределенность раскрывается, как «состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события, его последствий и их вероятностей» [2]. Таким образом терминология риска в литературных источниках и в стандарте сходятся в понимании риска, как неопределенности, приводящей к последствиям.

Актуальность освещения данной темы обусловлена ростом востребованности процессов и процедур управления рисками в управленческой практике. В исследовании компании ДРТ (Деловые решения и технологии) по уровню зрелости риск-менеджмента в российских компаниях за 2025 год (респонденты – 82 нефинансовые организации России): 60% учреждений разных форм собственности основное внимание уделяли развитию культуры управления рисками; 70% компаний в ближайшие годы планируют сконцентрировать усилия на развитии риск-культуры [3]. Результаты исследования фиксируют интерес учреждений к разработке системы управления рисками, повышению культуры регулирования рисков.

Цель данной работы – продемонстрировать результаты разработки рискориентированной модели управления процессами в кардиологическом диспансере.

База исследования: ГБУЗ «Кузбасский клинический кардиологический диспансер имени академика Л.С. Барабараша» (далее ГБУЗ «КККД»).

Предмет исследования – риск-менеджмент системы управления ГБУЗ «КККД».

Задачи данной статьи:

1.Проанализировать научные подходы к системе управления рисками.

2.Продемонстрировать рискориентируемую модель управления процессами в ГБУЗ «КККД».

Научные подходы к системе риск-менеджмента связаны с основными компонентами, а именно: идентификацией и анализом рисков, диагностикой и оценкой рисков, управлением и контроллингом рисков. Именно взаимосвязь перечисленных компонентов формирует современную систему управления рисками. В настоящее время разработаны и апробированы следующие научные методологии: FMEA-анализ, BSC (Balanced Scorecard), АММОР (аддитивно-мультипликативная модель оценки рисков, автор проф. Орлов А.И.) [4], матрица последствий и вероятностей [5], сценарное планирование [5]. На рисунке 1 автором статьи представлено использование научных подходов к компонентам управления рисками.

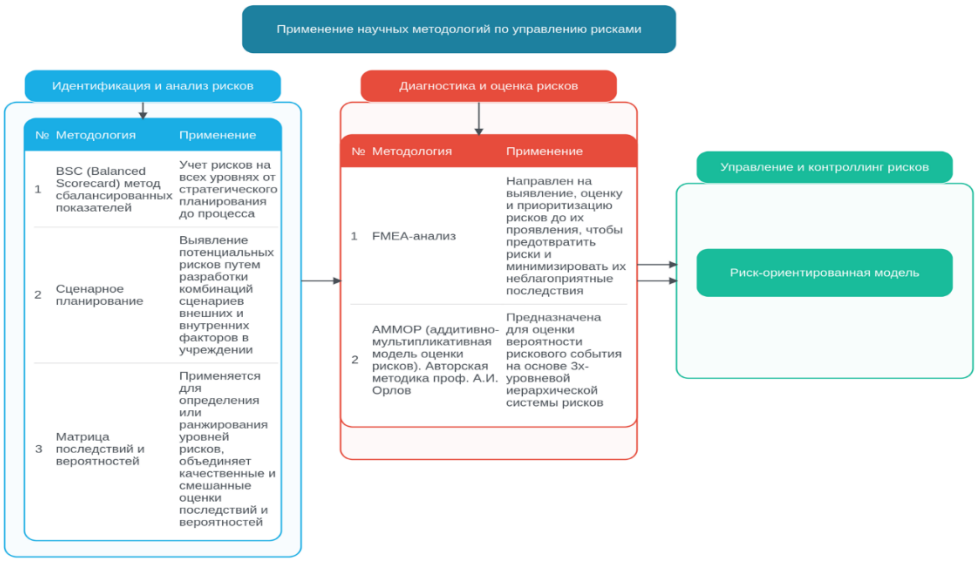


Рис. 1. Применение научных методологий по управлению рисками

Предложенное схематическое представление научных подходов по теории риск-менеджмента и их взаимосвязь с компонентами управления рисками формируют схему действий для административно-управленческого аппарата, нацеленную на создание устойчивой рискориентированной модели учреждения:

1. Совместное применение модели BSC и сценарного планирования позволяет идентифицировать риски от момента формирования стратегических целей учреждения до разработки всевозможных сценариев возникновения рисков для определения приоритетных и возможных рисков в деятельности учреждения. С помощью матрицы последствий и отказов ранжируются уровни рисков по группам внутренних процессов, определяются ответственные за анализ и оценку рисков, а также за оценку возможного ущерба и последствий при возникновении риска.

2. При диагностике и оценке рисков необходимо использовать несколько научных методов, например, производить оценку степени тяжести рисков с помощью FMEA-анализа, оценить вероятность рискового события с помощью отечественного научного метода АММОР профессора А.И. Орлова.

3. Визуализировать возможные риски учреждения в формате рискориентированной модели для дальнейшего управления риск-менеджментом в учреждении.

В Кузбасском клиническом кардиологическом диспансере имени академика Л.С. Барбараша разработана и внедрена рискориентированная модель системы управления внутренними процессами, позволяющая ответственным за направления деятельности учреждения оценивать риски, определять степень тяжести влияния на основные, сквозные и вспомогательные процессы. Разработана онлайн-таблица «Риски по процессам. FMEA-анализ» для расчета и ранжирования ПЧР (приоритетного числа риска), формирования мероприятий для снижения ПЧР (рис. 2).

Риски по процессам 2026г. КККД. FMEA - анализ								Результаты выполнения корректирующих мероприятий
Категория опасности		Риски	Где может произойти?	Частота, O	Тяжесть, S	ПЧР (Приоритетное число риска)	Запланированные коррект	Выполненные мероприятия
РП 06.03.02.02 Метрологическое обеспечение СИ	Вероятный	Получение недостоверных данных, вследствие использования не поверенного оборудования	Структурные подразделения	4	5	20		1. Контроль ответственного за метрологическое обеспечение период поверок СИ. 2.Поверять СИ, оборудование согласно графику поверок
	Маловероятный	Нанесение вреда пациенту (от получения недоставерных данных	Клинические отделения	1	6	6		1. Контроль за старшими медицинскими сестрами - ответственным за метрологическим обеспечением 2.Проведение обхода клинических отделений ответственным за метрологическое обеспечение, с целью контроля использования сотрудниками поверенного оборудования
	Маловероятный	Нарушение безопасных условий труда персонала	Структурные подразделения	1	5	5		1. Проведение трехступенчатого контроля. Оформление актов проверок, регистрация несоответствий 2.Проведение трехступенчатого контроля структурных подразделений службами организации: служба охрана труда, пожарная безопасность, гражданская оборона

Рис. 2. Онлайн-таблица «Риски по процессам. FMEA-анализ»

На основе применения научных подходов, методологий по управлению рисками разработана рискориентированная модель ГБУЗ «КККД», представленная на рисунке 3. Модель распространяется на основные, сквозные, вспомогательные процессы учреждения.

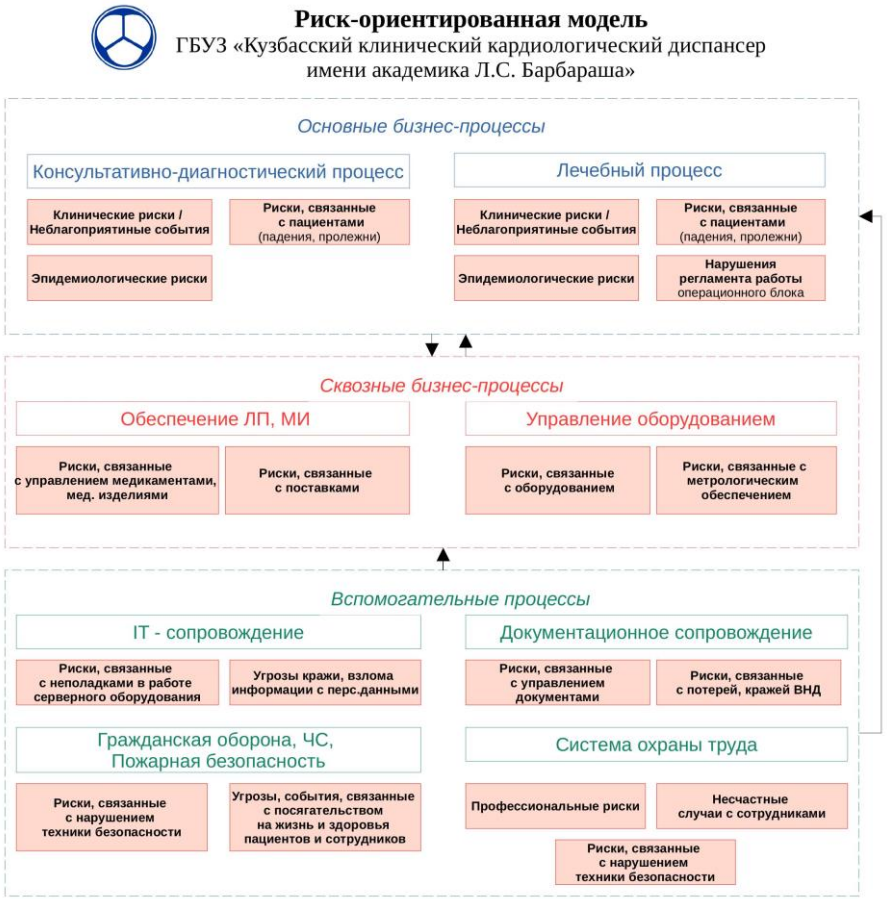


Рис. 3. Рискориентированная модель ГБУЗ «КККД»

Данная модель предназначена для визуализации внутренних рисков учреждения. Ежегодный анализ и оценка рисков с использованием модели, научных методов повышают эффективность управления неблагоприятными событиями и неопределенностью в учреждении.

Таким образом, применение риск-менеджмента в совокупности с использованием научных методов способствует эффективному поиску, анализу и оценки рисков, влияющие на деятельность учреждений.

Список литературы

1. Интегрированная система управления рисками: учебное пособие / И.А. Антипин, Э.В. Джалилов, Е.И. Кайбичева [и др.]. – Екатеринбург: УрГЭУ, 2025. –187 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.-URL: https://e.lanbook.com/book/517489 (дата обращения: 18.03.2026).
2. ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020-03-01. Федеральное агенство по техническому регулировванию. – Изд. Официальное. – Москва: Стандартинформ. 2020: 20с.
3. Исследование ДРТ: исследование уровня зрелости риск-менеджмента в российских компаниях (2025г). Электронный доступ. https://storage.delret.ru/research/uroven-zrelosti-upravleniya-riskami-2025.pdf
4. Орлов, А. И. Контроллинг организационно-экономических методов- новое научное направление в менеджменте : монография / А. И. Орлов. – Москва : Дашков и К, 2026. – 266 с. – ISBN 978-5-394-06442-5. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/514002 (дата обращения: 18.03.2026).
5. Администрирование и менеджмент в здравоохранении : учебное пособие / составители О. В. Медведева [и др.]. – Рязань : РязГМУ, 2024. – 234 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/460325 (дата обращения: 18.03.2026).
6. Асадулин, Е. О. Цифровизация управленческих процессов деятельности организаций: ключевые тенденции и предпосылки к автоматизации / Е. О. Асадулин, Р. А. Стрюков, С. А. Макаров // СМиС-2025. Технологии управления качеством : материалы Международной научно-технической конференции, Москва, 21–24 мая 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 590–594.
7. Селюков, В. К. Риск-менеджмент организации : учебное пособие / В. К. Селюков. – Москва : МГТУ им. Баумана, 2008. – 188 с.-ISBN 978-5-7038-3205-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.-URL: https://e.lanbook.com/book/58572 (дата обращения: 18.03.2026).
8. Стратегическое управление профессиональными рисками : учебное пособие / Д. С. Алешков, Е. В. Бакико, Е. А. Бедрина, М. В. Суковин. – Омск : ОмГТУ, 2024. – 134 с. – ISBN 978-5-8149-3853-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/504281 (дата обращения: 18.03.2026).
9. Булетова, Н. Е. Управление информационными рисками в организации : учебное пособие / Н. Е. Булетова, Н. Н. Карпухина. – Москва : РТУ МИРЭА, 2024. – 85 с. – ISBN 978-5-7339-2334-5. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/448973 (дата обращения: 18.03.2026).
10. Солодовников, Ю. Л. Экономика и управление в здравоохранении : учебное пособие для вузов / Ю. Л. Солодовников. – Санкт-Петербург : Лань, 2026. – 312 с. – ISBN

978-5-507-55959-6. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/512272 (дата обращения: 18.03.2026).

11. Меняев, М. Ф. Математические методы и модели управления качеством : учебник для вузов / М. Ф. Меняев. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2026. – 104 с. – ISBN 978-5-507-54988-7. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/513867 (дата обращения: 18.03.2026).

12. Кутергин, В. А. Бизнес-инжиниринг. Модельная интерпретация управления изменениями / В. А. Кутергин. – 2-е изд., испр. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 396 с. – ISBN 978-5-507-49013-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/367514 (дата обращения: 18.03.2026).

Демус А.А.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
demusanastasia@gmail.com
Парфеньева И.Е.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
iparfeneva@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КАРТОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПЛАТЕЖНОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме адаптации и внедрения принципов системы менеджмента качества (СМК) в специфическую область производства банковских карт национальной платежной системы. В условиях обеспечения технологического суверенитета, импортозамещения и бесперебойности критической финансовой инфраструктуры качество карточной продукции становится не просто рыночным преимуществом, а обязательным требованием безопасности и надежности. В работе приведен многоаспектный анализ особенностей платежной карты как сложного объекта управления качеством, сочетающего в себе физические, электронные, идентификационные и защитные характеристики. Предложена и обоснована методика идентификации и ранжирования критических процессов жизненного цикла продукции. На основе проведенного анализа разработаны и формализованы детальные требования к ключевым процессам СМК: проектированию и разработке, управлению поставщиками, производственным операциям, контролю и испытаниям, а также управлению несоответствиями. Особое внимание уделено обоснованию необходимости разработки и внедрения объективной оценки непрерывного мониторинга вендоров (производителей карт) в условиях динамично меняющейся конъюнктуры рынка. Результаты работы направлены на создание унифицированной и стандартизированной нормативной базы, позволяющей производителям карт выстроить эффективную СМК, снизить операционные риски и гарантировать высокий уровень качества выпускаемой продукции.

Ключевые слова: система менеджмента качества, платежная карта, жизненный цикл продукции, управление качеством, вендор, стандартизация, технологический процесс, контроль качества, оценка поставщиков.

Demus A.A.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
demusanastasia@gmail.com
Parfenyeva I.E.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
iparfeneva@mail.ru

DEVELOPMENT OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM REQUIREMENTS FOR LIFE CYCLE PROCESSES OF PAYMENT SYSTEM CARD PRODUCTS

Abstract. The article is devoted to the urgent problem of adapting and implementing the principles of a quality management system (QMS) in the specific area of manufacturing bank cards for the national payment system. In the context of ensuring technological sovereignty, import substitution, and the continuity of critical financial infrastructure, the quality of card products is becoming not just a market advantage but a mandatory requirement for safety and reliability. The paper provides a multidimensional analysis of the features of a payment card as a complex object of quality management, combining physical, electronic, identification, and security characteristics. A methodology for identifying and ranking critical processes of the product life cycle is proposed and substantiated. Based on the analysis, detailed requirements for key QMS processes have been developed and formalized, including: design and development, supplier management, production operations, control and testing, and nonconformity management. Special attention is paid to substantiating the need for developing and implementing an objective assessment and continuous monitoring system for vendors (card manufacturers) in a dynamically changing market environment. The results of the work are aimed at creating a unified and standardized regulatory framework that allows card manufacturers to build an effective QMS, reduce operational risks, and guarantee a high level of product quality.

Keywords: quality management system, payment card, product life cycle, quality management, vendor, standardization, technological process, quality control, supplier assessment.

В условиях современной глобальной экономики и усиливающейся геополитической напряженности, национальная платежная система (ПС) выполняет роль не только удобного финансового инструмента, но и ключевого элемента обеспечения финансового суверенитета и стратегической инфраструктурной независимости Российской Федерации. Масштабы эмиссии карт демонстрируют колоссальный охват: по состоянию на 1 октября 2024 года было выпущено 371 млн. карт, что составляет 62,2% всего российского рынка платежных карт [7]. Бесперебойность, надежность и безопасность выпуска такого объема карточной продукции напрямую зависят от эффективности и зрелости систем менеджмента качества (СМК), внедренных у производителей.

Платежная карта представляет собой уникальный, многокомпонентный объект управления качеством, сочетающий в себе свойства физического носителя, идентификационного документа, защищенного электронного устройства и финансового инструмента, от работы которого зависит ежедневный пользовательский опыт миллионов граждан. Традиционные, «шаблонные» подходы к построению СМК, описанные в стандартах ИСО серии 9000, требуют глубокой и осмысленной адаптации к специфике данного продукта. Невозможно эффективно управлять качеством карты, не понимая физики процесса ламинации, особенностей радиочастотного интерфейса и криптографической защиты транзакций. Именно эта междисциплинарная сложность и определяет высокую актуальность настоящего исследования.

Целью работы является повышение качества и надежности карточной продукции ПС за счет разработки, формализации и внедрения научно обоснованных требований СМК и ключевых процессов жизненного цикла. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: проведение анализа текущего состояния процессов, идентификация критических и наименее регламентированных областей; разработка детализированных требований к ключевым процессам СМК; формализация системы контроля качества; а также обоснование необходимости и определение базовых принципов построения системы объективной оценки вендоров.

Методологическая база настоящего исследования носит комплексный характер и включает в себя несколько взаимодополняющих подходов.

Во-первых, был проведен всесторонний анализ нормативно-правовой и технической документации. Он охватывал базовые стандарты в области СМК (прежде всего, ГОСТ Р ИСО 9001-2015, закрепляющий процессный и рискориентированный подходы [1]), отраслевые стандарты и требования ПС, а также комплекс международных и гармонизированных с ними национальных стандартов на идентификационные карты. Среди последних ключевыми являются: ГОСТ Р ИСО/МЭК 7810 [2], серия ГОСТ Р ИСО/МЭК 7816 [3], серия ГОСТ Р ИСО/МЭК 10373 [4] и серия ГОСТ Р ИСО/МЭК 14443 [5].

Во-вторых, для анализа текущего состояния и выявления «узких мест» в процессах производителей карт использовались качественные и количественные методы. Был применен метод экспертных оценок с привлечением специалистов ПС и производителей, проведен SWOT-анализ системы управления качеством, а также выполнен статистический анализ обезличенных данных о несоответствиях, выявленных в ходе аудиторских проверок за 2024–2025 годы.

В-третьих, для решения ключевой задачи исследования – идентификации и ранжирования процессов СМК по степени их критичности и влияния на конечное качество продукта, была применена адаптированная методология структурирования функции качества «Дом качества» (Quality Function Deployment, QFD) в сочетании с методами экспертной балльно-рейтинговой

оценки. Выбор данного подхода позволил перейти от субъективных экспертных мнений к формализованной процедуре определения приоритетов для последующей разработки требований СМК. При разработке самих требований к процессам использовались фундаментальные принципы процессного подхода (идентификация входов, выходов, владельца процесса, необходимых ресурсов) и рискориентированного мышления (идентификация и оценка потенциальных рисков для каждой технологической операции), заложенные в ГОСТ Р ИСО 9001 [1].

Идентификация критических процессов и областей для улучшения

Детальный анализ специфики жизненного цикла платежной карты, от этапа проектирования дизайна до момента утилизации, в совокупности со статистикой несоответствий позволил выделить критические процессы, оказывающие доминирующее влияние на качество и безопасность конечного продукта.

Анализ данных о функционировании систем менеджмента качества производителей карт, проведенный в 2024–2025 годах, демонстрирует устойчивое распределение областей для улучшения по разделам стандарта ГОСТ Р ИСО 9001 [1].

К числу разделов, требующих наибольшего внимания, относятся:

- Раздел 7 Средства обеспечения. На протяжении рассматриваемого периода данный раздел стабильно характеризовался высокой долей фиксируемых несоответствий. Это указывает на наличие системных сложностей в управлении ресурсами, включая обеспечение компетентности персонала, поддержание инфраструктуры и, что особенно важно, управление знаниями при работе со сложным технологическим оборудованием;

- Раздел 8 Деятельность на стадиях жизненного цикла продукции и услуг. Данный раздел также демонстрирует высокий и относительно стабильный уровень выявляемых несоответствий. Это подтверждает необходимость дальнейшей детализации и регламентации производственных операций, в особенности таких, как производственные процессы, а также процессов входного контроля и управления цепочкой поставок;

- Раздел 4 Среда организации. В 2025 году было зафиксировано увеличение доли несоответствий по данному разделу относительно предыдущего года. Это может свидетельствовать о необходимости более глубокой проработки вопросов, связанных с пониманием контекста организации, потребностей заинтересованных сторон и, как следствие, с определением области применения СМК;

- Раздел 9 Оценка результатов деятельности. Наблюдается незначительная отрицательная динамика по данному разделу. Это указывает на наличие потенциала для повышения эффективности процессов внутреннего аудита, анализа СМК со стороны руководства и, что наиболее важно, процессов управления несоответствиями и корректирующих действий.

На основе проведенного анализа и балльно-рейтинговой оценки было установлено, что приоритетными для регламентации и внедрения строгих

процедур управления являются процессы управления поставщиками, производственные процессы (особенно «печать» и «имплантация»), а также процессы контроля и испытаний, включая входной и выходной контроль.

SWOT-анализ, проведенный для обобщенной системы управления качеством производителей карт, выявил следующие ключевые аспекты (таблица 1).

Таблица 1

Результаты SWOT-анализа

Сильные стороны	Слабые стороны
Наличие у большинства вендоров парка измерительного и производственного оборудования, многолетний опыт работы, налаженные каналы сбыта.	Высокая зависимость от импортных материалов и компонентов (чипы, краски, ламинат), недостаточная стандартизация процедур входного контроля, «лоскутная» автоматизация и отсутствие единой информационной среды (MES-систем) для прослеживаемости, а также нехватка квалифицированного персонала, обладающего одновременно знаниями в полиграфии, электронике и СМК.
Возможности	Угрозы
Программа импортозамещения и появления отечественных производителей чип-модулей и пластиков, внедрение цифровых инструментов контроля качества (машинное зрение), развитие системы отраслевой стандартизации и создание единых центров компетенций.	Санкционные ограничения на поставку критических компонентов, волатильность курса валют, усиление конкуренции на внутреннем рынке, развитие альтернативных способов оплаты, а также возрастающие требования к информационной безопасности и защите от мошенничества.

Адаптация методологии QFD для ранжирования процессов СМК

Классическая методология QFD, широко известная как «Дом качества», традиционно применяется для трансформации требований потребителя в конкретные инженерные характеристики продукта на этапе проектирования. В рамках данного исследования методология QFD была творчески переосмыслена и адаптирована для решения обратной задачи: не для проектирования нового продукта, а для анализа и совершенствования систем управления процессами его производства.

В роли «Потребителя» выступила сама Платежная система и конечные пользователи – держатели карт. Их требования были формализованы в виде ключевых требований к качеству и безопасности карточной продукции, выявленных в ходе анализа стандартов ПС и статистики рекламаций. К таким требованиям были отнесены: «Бесперебойности чтения чипа», «Долговечность карты (стойкость к износу)», «Соответствие Товарного знака (качество печати)», «Защищенность от подделки», «Корректная работа в терминалах», «Скорость проведения транзакции» и т.д.

В роли «Технических характеристик» выступили ключевые процессы СМК производителя карты, идентифицированные на предыдущих этапах анализа (например, «Процесс входного контроля материалов», «Процесс

управления оборудованием», «Процесс обучения персонала», «Процесс производства» и др.).

Центральным элементом адаптированного «Дома качества» стала матрица взаимосвязей, в которой эксперты оценивали силу влияния каждого процесса СМК на удовлетворение каждого требования к качеству карты. Для оценки использовалась следующая шкала:

- 9 балов – сильная (прямая и критическая) взаимосвязь. Процесс оказывает определяющее влияние на выполнение требования. Например, процесс «Имплантация чипа» имеет сильную связь с требованием «Бесперебойность чтения чипа»;
- 3 балла – средняя (заметная) взаимосвязь. Процесс вносит существенный вклад в обеспечение требования. Например, процесс «Входной контроль клея» имеет среднюю связь с требованием «Долговечность карты»;
- 1 балл – слабая (косвенная) взаимосвязь. Процесс оказывает опосредованное влияние. Например, процесс «Управление документацией» имеет слабую связь с требованием «Корректная работа в терминалах»;
- 0 баллов – взаимосвязь отсутствует.

Расчет интегрального показателя критичности процесса

На следующем этапе была проведена экспертная балльно-рейтинговая оценка. Группе экспертов из числа ПС и ведущих производителей карт было предложено:

1) Оценить важность каждого требования по 5-балльной шкале (где 5 – критически важно, 1 – малозначимо). Это позволило определить весовые коэффициенты (W_i) для каждого требования.

2) Оценить текущий уровень реализации каждого процесса СМК на среднестатистическом предприятии-производителе по 5-балльной шкале (где 5 – процесс реализован на уровне лучших мировых практик, 1 – процесс находится в неудовлетворительном состоянии). Этот показатель (S_j) характеризует текущую проблемность или, наоборот, зрелость процесса.

На основе данных из матрицы взаимосвязей и полученных экспертных оценок для каждого процесса СМК рассчитывался интегральный показатель его критичности и приоритетности для улучшения – индекс приоритетности процесса (IPP_j) по следующей формуле

$$IPP_j = \sum_{i=0}^{n} \left(W_i \times R_{ij}\right), \quad (1)$$

где IPP_j – индекс приоритетности для j-го процесса СМК;

W_i – весовой коэффициент важности i-го требования потребителя;

R_{ij} – оценка силы взаимосвязи между i-м требованием и j-м процессом;

n – общее количество анализируемых требований к качеству.

Чем выше значение IPP_j тем большее влияние данный процесс оказывает на удовлетворение наиболее важных требований к качеству, и, следовательно, тем выше его приоритет для регламентации и улучшения в рамках СМК.

3) Сформировать матрицы приоритетов.

На заключительном этапе анализа была построена матрица приоритетов (таблица 2), где все идентифицированные процессы СМК были позиционированы в двумерном пространстве: по оси X – индекс приоритетности процесса (IPP_j), по оси Y – оценка текущего уровня реализации процесса (S_j).

Таблица 2

Матрица приоритетов (матрица Эйзенхаузера)

Квадрант I. «Критические и проблемные»	Квадрант II. «Ключевые драйверы качества»
Процессы с высоким IPP_j и низкой текущей оценкой S_j. Требуют немедленных и радикальных улучшений. В эту зону попали процессы «Оценка результатов деятельности», «Производство» и «Входной контроль».	Процессы с высоким IPP_j и высокой текущей оценкой S_j. Являются конкурентным преимуществом, их необходимо поддерживать на достигнутом уровне и непрерывно совершенствовать. Сюда вошел процесс «Контроль и испытания готовой продукции».
Квадрант III. «Зона потенциальных улучшений»	Квадрант IV. «Зона стабильности»
Процессы с низким IPP_j, но и с низкой текущей оценкой S_j. Могут быть улучшены при наличии свободных ресурсов.	Процессы с низким IPP_j и высокой текущей оценкой S_j. Не требуют первоочередного внимания.

Данная матрица позволила наглядно классифицировать процессы на четыре категории: «критические и проблемные»; «ключевые драйверы качества»; «зона потенциальных улучшений»; «зона стабильности».

Данный методический подход, сочетающий адаптированную QFD и балльно-рейтинговую оценку, позволил не просто субъективно определить ключевые процессы, а научно обосновать их приоритетность на основе количественного анализа их вклада в удовлетворение ключевых требований к качеству конечного продукта – платежной карты. Результаты этого анализа легли в основу разработки детализированных требований к ключевым процессам СМК.

Разработка требований к ключевым процессам СМК

На основе проведенного анализа и идентификации критических точек были определены ключевые процессы СМК, требующие формализации и внедрения у производителей карточной продукции ПС. При этом важно разграничить процессы, уже в достаточной степени регламентированные требованиями самой ПС, и те, где существует значительный люфт для внедрения требований СМК.

Установлено, что требования к испытаниям продукции и по безопасности уже имеют высокую степень регламентации. Требования к дизайну, расположению элементов, физическим и электрическим характеристикам карты, а также методы и объемы их испытаний детально прописаны в стандартах ПС, руководствах по дизайну и спецификациях производителей, основанных на международных стандартах серии ГОСТ Р ИСО/МЭК [2, 3, 4, 5] и др.

Производитель обязан строго следовать этим документам, что является обязательным условием для получения и поддержания статуса одобренного вендора ПС.

Основное внимание в настоящем исследовании было уделено разработке требований для тех процессов, которые, с одной стороны, были идентифицированы как критические (согласно анализу QFD), а с другой – являются наименее формализованными в стандартах ПС, оставляя широкое поле для внедрения собственных эффективных практик производителя. К таким процессам относятся: «Закупки и управление поставщиками», «Производство и контроль на операциях» и «Управление несоответствующей продукцией». Для каждого из них требуется разработка методологических принципов и структура требований.

Важно подчеркнуть, что разрабатываемые требования не являются универсальным шаблоном, а должны быть адаптированы под специфику каждого конкретного производителя карточной продукции ПС. В связи с этим, в рамках исследования были сформулированы не столько финальные требования, сколько методологические принципы и структура, в соответствии с которыми эти требования должны быть разработаны и задокументированы в стандартах организации.

Для каждого из перечисленных ниже процессов предлагается следующий подход к формированию требований.

Процесс «Закупки и управление поставщиками». В условиях сохраняющейся высокой зависимости от импортных материалов и компонентов (чипы, краски, ламинат), а также в рамках реализации программы импортозамещения, требования к данному процессу должны быть направлены на создание прозрачной, многоуровневой и объективной системы управления цепочкой поставок, минимизирующие риски сбоев. Разрабатываемая в рамках СМК производителя документированная процедура должна регламентировать:

а) Процедуру квалификации, планового и внепланового аудита, а также регулярной (например, ежеквартальной) оценки поставщиков всех уровней (производителей чипов, пластика, красок и т.д.). Ключевым требованием является создание и введение собственного реестра одобренных поставщиков, основанного на объективных критериях;

б) Строгие правила прослеживаемости партий материалов и компонентов по всей внутренней цепочке – от момента поступления на склад до отгрузки готовой карты;

в) Процедуру входного контроля, которая должна включать не только проверку сопроводительной документации, но и обязательные инструментальные и функциональные испытания выборки каждой поступающей партии критически важных компонентов. Методы и объемы таких испытаний должны быть четко формализованы в зависимости от уровня критичности компонента и истории качества поставщика.

Процесс «Производство и контроль на операциях». Требования к производственным процессам должны разрабатываться с целью минимизации вариабельности и обеспечения стабильного качества на каждой технологической операции, особенно на тех, которые были отнесены к «критическим и проблемным». Разрабатываемая документация (технологические/рабочие инструкции, карты контроля) должна содержать:

а) Конкретные, измеримые критерии качества для каждой операции с указанием номинальных значений и допустимых отклонений. Например, для операции ламинации должны быть регламентированы допуски на температуру, давление и время выдержки, а также методы оценки качества поверхности на отсутствие непроваров и деформации листа;

б) Описание методов и периодичности межоперационного контроля для каждого критерия. Должна быть установлена обязанность оператора не только выполнять операцию, но и контролировать ее ключевые параметры;

в) Требования к ведению записей по качеству, позволяющих отслеживать параметры процесса и выявлять тренды для предупреждения появления брака.

Процесс «Управление несоответствующей продукцией». Учитывая рост доли несоответствий в разделе 9 «Оценка результатов деятельности», требования к данному процессу должны обеспечивать не просто фиксацию брака, а оперативную локализацию проблем, глубокий анализ их корневых причин и предотвращение повторения. Разрабатываемая документированная процедура должна регламентировать:

а) Порядок идентификации и изоляции несоответствующей продукции на всех этапах производства;

б) Методологию анализа корневых причин (с обязательным использованием таких инструментов качества, как диаграмма Исикавы и метод «5 почему»);

в) Процедуру разработки, внедрения и контроля эффективности корректирующих и предупреждающих действий;

г) Требования по ведению базы данных по несоответствиям для анализа трендов и разработки предупреждающих действий.

Таким образом, предложенный подход к разработке требований позволяет производителям карт сконцентрировать свои усилия на совершенствовании «внутренних» процессов СМК. Это обеспечивает создание действенного механизма непрерывного совершенствования, основанного на рискориентированном мышлении и процессном подходе, что в итоге

направлено на снижение уровня производственного брака и повышение стабильности качества, способствуя тем самым положительному опыту населения в использовании карт ПС.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования».
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7810-2015 «Идентификационные карты. Физические характеристики».
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7816-1-2013 «Карты идентификационные. Карты на интегральных схемах с контактами. Часть 1. Карты с контактами. Физические характеристики».
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 10373-1-2010 «Карты идентификационные. Методы испытаний. Часть 1. Общие характеристики».
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 14443-1-2013 «Карты идентификационные. Карты на интегральных схемах бесконтактные. Карты близкого действия. Часть 1. Физические характеристики».
6. Федеральный закон «О национальной платежной системе» от 27.06.2011 № 161-ФЗ (последняя редакция). – Текст: электронный // КонсультантПлюс. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_115625/ (дата обращения 12.04.2026).
7. Основные направления развития национальной платежной системы на период 2025–2027 годов. – Текст: электронный // Банк России. – URL: https://www.cbr.ru/Content/Document/File/170680/onrnps_2025-27.pdf (дата обращения 12.04.2026).
8. Васильев В.А. Менеджмент качества в условиях цифровой трансформации: учебное пособие / В.А. Васильев. – М.: МАИ, 2003. – 86 с.
9. Прокофьева Т.А. Системный анализ в менеджменте: учебник для вузов / Т.А. Прокофьева, В.В. Челноков. – Москва: Издательство Юрайт, 2026. – 313 с.
10. Соловьев Е.А. Платежные системы – вчера, сегодня и…завтра? /Е.А. Соловьев. – М.: Триумф, 2025. – 600 с.

Гаврилов М.В.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
mvg1313@mail.ru

СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА В НИИ

Аннотация. В работе анализируется опыт внедрения систем менеджмента качества в научно-исследовательских организациях в Российской Федерации. Подчеркивается существующая проблема необходимости стандартизации процедур в научной сфере при внедрении принципов всеобщего менеджмента качества, и прежде всего процессного подхода, что осложняется творческим характером данного вида деятельности. Качество научно-исследовательских работ рассматривается как стратегическая государственная задача.

Ключевые слова: система менеджмента качества; всеобщий контроль качества; процессный подход; научно-исследовательские организации.

Gavrilov M.V.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
mvg1313@mail.ru

QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS IN RESEARCH INSTITUTES

Abstract. The paper analyzes the experience of implementing quality management systems in research organizations in the Russia. It highlights the existing problem of the need to standardize procedures in the scientific field when implementing the principles of universal quality management, and above all, the process approach, which is complicated by the creative nature of this type of activity. The quality of research work is considered a strategic national task.

Keywords: quality management system; universal quality control; process approach, scientific research organizations.

В условиях цифровизации экономики и реализации политики технологического суверенитета страны обеспечение качества научно-исследовательских работ (НИР) становится стратегической государственной задачей, что нашло свое отражение в Указе Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [1]. Деятельность научно-исследовательских организаций (НИИ) сопряжена с высокой неопределенностью результата и сложностью получения интеллектуального продукта, что определяет специфику применения систем менеджмента качества в НИИ при проведении НИР, простое копирование производственных стандартов для исследовательской деятельности неэффективно и нецелесообразно.

Вместе с тем, встраивание принципов всеобщего менеджмента качества, и прежде всего процессного подхода, в исследовательскую методологию способно не только повысить прозрачность расходования бюджетных средств, но и обеспечить воспроизводимость – фундаментальный критерий научности [2].

Ключевая проблема, рассматриваемая в настоящей статье, состоит в противоречии между творческой природой научного поиска, слабо подчиняющегося любой стандартизации, и жестким требованием стандартизации процедур, лежащим в основе базовых моделей ISO 9001, а также отраслевых стандартов.

Целью работы является анализ существующего опыта внедрения систем менеджмента качества (СМК) в российских НИИ, выявление специфики данной деятельности в научной сфере и факторов результативности СМК в научно-исследовательской среде.

Исследование опирается на изучение опыта российских научных организаций, прошедших сертификацию систем менеджмента качества. Для анализа были выбраны пять организаций:

1) Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). Является примером интеграции СМК с дорогостоящей экспериментальной базой и международной кооперацией.

2) Институт катализа имени Г.К. Борескова СО РАН. Внедрен процессный подхода на полном жизненном цикле.

3) Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН. Здесь была отмечена проблема сопротивления персонала нововведениям и расхождение в формальных и реальных практиках.

4) Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор». Можно рассматривать как образец директивного внедрения стандартов в оборонной науке.

5) Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора. СМК внедрялась в доклинических токсикологических исследованиях.

Применен качественный анализ документов и анализ научных исследований по данной тематике. Эмпирическую базу составили: внутренняя документация организаций по качеству – руководства по качеству, стандарты предприятия, записи внутренних аудитов, находящиеся в открытом доступе.

Рассмотрим опыт ведущих российских научных организаций, в разное время прошедших сертификацию систем менеджмента качества. Характерным примером успешной адаптации может служить Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского [11], где система качества изначально выстраивалась не как административная надстройка, а как неотъемлемый элемент обеспечения достоверности экспериментальных данных. Специфика деятельности ЦАГИ, связанная с проведением дорогостоящих испытаний в аэродинамических трубах, требует строжайшей повторяемости условий эксперимента и фиксации измерений, что соответствует требованиям стандарта к управлению измерительным оборудованием, валидации методик и ведению записей. Внедренная в институте система менеджмента качества, сертифицированная на соответствие ГОСТ Р ИСО 9001 и дополнительным авиационным стандартам, позволила не только сохранить позиции на международном рынке аэродинамических услуг, но и стала обязательным условием участия в таких кооперационных проектах, как создание российско-китайского широкофюзеляжного самолета CR929. Лаборатории института демонстрируют интеграцию принципов менеджмента качества непосредственно в исследовательский процесс.

Другой тип внедрения СМК демонстрируют институты Российской академии наук, ориентированные на фундаментальные исследования. Для них прямое применение стандартов серии ISO 9000 долгое время рассматривалось как экзогенное и чуждое в силу специфики научного продукта, ценность которого не всегда очевидна для потребителя в момент получения.

В Институте катализа имени Г. К. Борескова СО РАН [10] внедрение системы менеджмента качества было инициировано не столько внешними требованиями, сколько внутренней логикой развития – необходимостью трансфера технологий от лабораторного синтеза к промышленному производству катализаторов. Процессная модель института описывает полный жизненный цикл: от фундаментального поискового исследования через прикладную разработку, масштабирование на пилотных установках до передачи технологии на заводы нефтехимической отрасли. Документально закреплены процедуры управления инженерной инфраструктурой и парком уникальных научных установок, что обеспечивает прозрачность и обоснованность заявок на бюджетное финансирование. Критически важным для института оказалось внедрение процедуры управления рисками по ГОСТ Р ИСО 31000, адаптированной к неопределенности исследовательских проектов: вместо директивного запрета на отклонения система предписывает их обязательную регистрацию, анализ причин и корректировку гипотез, что методологически точно соответствует логике научного метода.

Проблема сопротивления персонала и превращения СМК в дополнительный документооборот особенно остро стоит в учреждениях с большой долей фундаментальных исследований [6]. При этом формально сертифицированная система качества сосуществует с низкой культурой ведения первичной научной документации. Лабораторные журналы, вопреки требованиям внутренних стандартов, продолжают вестись на разрозненных листах, а процедуры валидации аналитических методик игнорируются как избыточные. Причина этого кроется в отсутствии связи между системой менеджмента качества и системой мотивации научного труда. Конкретные примеры из практики внутренних аудитов Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН [14] показывают, что преодоление этого барьера возможно при передаче ответственности за актуализацию документов СМК непосредственно в научные подразделения и создании временных коллективов, состоящих из самих исследователей, для разработки стандартов предприятия на проведение измерений. Когда форма документа становится результатом консенсуса профессионалов, а не спущенным сверху шаблоном, она перестает восприниматься как бюрократическая обуза и превращается в инструмент сохранения и передачи методического знания внутри научной организации.

Оборонные научно-исследовательские институты реализуют наиболее директивный путь внедрения систем качества, продиктованный требованиями государственных заказчиков. Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» [12], как головная научная организация в своей области, обязан выстраивать систему менеджмента качества в соответствии с ГОСТ РВ 0015-002 [3], который существенно жестче гражданских аналогов. Особенностью научной деятельности здесь является работа с изделиями, находящимися на стыке НИР и ОКР, что требует формализации процессов проверки и утверждения научно-технической документации на всех этапах.

Внедрение интегрированной СМК, объединяющей требования к качеству, охране труда и экологической безопасности, привело к значительному снижению числа ошибок на стадии проектирования, выявляемых при испытаниях опытных образцов, за счет обязательных процедур расчетно-экспериментальной верификации моделей и междисциплинарных проверок. Однако издержками такого подхода становятся бюрократизация и удлинение сроков принятия конструкторских решений.

Отдельного рассмотрения заслуживает опыт научных учреждений, работающих в сфере фармацевтики и токсикологии. Для таких организаций, как Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора [12], соблюдение принципов СМК при проведении доклинических исследований токсичности пестицидов и агрохимикатов является условием признания их результатов на международном уровне. Здесь система качества регламентирует не общие организационные вопросы, а непосредственно исследовательский процесс: от приготовления и характеризации тестируемых образцов до архивирования первичных данных, которые должны храниться десятилетиями и быть доступны для независимого аудита. Инспекции ОЭСР, которые прошли несколько российских центров, подтвердили, что скрупулезное соблюдение стандартных операционных процедур не только не мешает, но и является единственным способом гарантировать воспроизводимость и сопоставимость столь сложных биологических экспериментов.

Проведенный анализ позволяет утверждать, что ключевым фактором результативности СМК в НИИ выступает не сам по себе факт сертификации, а глубина интеграции принципов всеобщего менеджмента качества в систему генерирования знаний и проведения научных исследований. В случаях чисто административного внедрения СМК неизбежно превращается в излишний документооборот, имитирующий качество. Напротив, когда принципы принятия решений на основе фактов, процессного подхода и постоянного улучшения принимаются персоналом как свойственные научной среде, система качества преобразуется в организационную технологию, повышающую эффективность и достоверность исследований. Форма документа, ставшая результатом достижения консенсуса среди профессионалов, из бюрократической обузы превращается в инструмент сохранения методического наследия. Анализ подтверждает, что механистический перенос моделей ISO 9001 в исследовательскую среду порождает простое имитирование и сопротивление персонала. Перспективы внедрения и дальнейшего развития СМК в НИИ будут связаны с расширением круга заинтересованных сторон, уходом от восприятия роли СМК только как инструмента внутреннего контроля, а также с формированием концепции ответственных исследований и инноваций.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. 2024. № 9. Ст. 1245.
2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» (утв. Приказом Росстандарта от 28.09.2015 №1391-ст)**.**
3. ГОСТ РВ 0015-002-2020 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования» (утв. Приказом Росстандарта от 31.12.2020 №132-ст, с изменениями от 30.04.2021 №19-ст)**.**
4. Артамонова Г. В. и др. Опыт вовлечения персонала в управление деятельностью медицинской научно-исследовательской организации // Здравоохранение Российской Федерации. 2020. Т. 64, № 5.
5. Володарская Е.А., Киселева В.В. Имитационные практики в российской науке: социологический анализ // Социология науки и технологий. 2019. Т. 10, № 2. С. 112–128.
6. Гаврилова Т.М. Мотивация персонала в бережливом производстве // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы. 2017. С. 150-159.
7. Голдратт Э. М. Цель. Процесс непрерывного совершенствования / Э. М. Голдратт, Д. Кокс; пер. с англ. Е. Федурко. Минск, 2009. 496 с.
8. Деминг У. Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / У. Э. Деминг; пер. с англ. Ю. Адлер, В. Шпер. Москва, 2007. 370 с.
9. Джордж С. Всеобщее управление качеством TQM: стратегии и технологии, применяемые сегодня в самых успешных компаниях / С. Джордж, А. Ваймерскирх ; [пер. с англ.]. Санкт-Петербург, 2002. 252 с.
10. Официальный сайт ФИЦ «Институт катализа СО РАН» [сайт] – URL: http://www. catalysis.ru
11. Официальный сайт ФАУ «ЦАГИ». Система менеджмента качества [сайт] – URL: http://www. tsagi.ru
12. Официальный сайт Федеральное бюджетное учреждение науки
13. «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» [сайт] – URL: https://фнцг.рф
14. Официальный сайт АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» [сайт] – URL: http://www.gidropribor.ru
15. Официальный сайт Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН [сайт] – URL: http://www.imp.uran.ru.%20/
16. Шарифов Г. Г. Внедрение стандарта ISO 9001:2015 в НИИ животноводства: опыт и рекомендации // Экономика сельского хозяйства. 2023. № 44.

Кудряшов Е.А.
аспирант
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
Россия, Самара
zgeg35@mail.ru

СТАНОВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБУЧЕНИЯ «TRAINING WITHIN INDUSTRY»

Аннотация. Среди наиболее актуальных вопросов в развитых странах является острая нехватка квалифицированных кадров. Решением данного вопроса может стать методика «Training Within Industry» или сокращенно (TWI). TWI – это методика, направленная на быстрое и стандартизированное освоение трудовых операций на рабочем месте. Данная методика включает в себя алгоритм последовательных шагов, включающих знакомство с инструктором, инструктаж на рабочем месте, повторение действий наставника и завершение инструктажа. В основе методики лежит дробление процесса на составные этапы, проверка понимания каждого этапа, а также акцент на ключевых пунктах. В статье представлены периоды формирования данной методики, её эффективность, а также предпосылки создания. Методика TWI зародилась в США как вынужденная мера для помощи промышленности во время войны. Методика показала свою эффективность и позволила привлечь, а также оперативно обучить значительное число кадров, что сыграло важную роль во второй мировой войне. В наше время на методику обратили внимание, как на инструмент повышения конкурентоспособности предприятий. Однако, в среднесрочной перспективе TWI может стать востребованным инструментом сохранения темпов экономики, за счет обеспечения адаптации и взаимозаменяемости кадров в особенности для стран, показывающих в последние годы низкую динамику рождаемости и восполняющих нехватку кадров за счет привлечения мигрантов.

Ключевые слова: система обучения, организация производства, наставничество, управление, качество, дефицит кадров.

Kudryashov E.A.
Postgraduate Student
Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
Russia, Samara
zgeg35@mail.ru

FORMATION OF THE TRAINING WITHIN INDUSTRY SYSTEM

Abstract. One of the most pressing issues in developed countries is the acute shortage of qualified personnel. The «Training Within Industry» (TWI) methodology may offer a solution. TWI is a methodology aimed at quickly and standardized mastery of work procedures on the job. This methodology includes an algorithm of sequential steps, including meeting an instructor, on-the-job instruction, repeating the instructor's actions, and completing the instruction. The methodology is based on breaking the process down into component stages, checking understanding of each stage, and emphasizing key points. This article discusses the periods in which this methodology emerged, its effectiveness, and the background to its creation. TWI originated in the United States as a necessary measure to support industry during the war. The methodology proved its effectiveness and allowed for the recruitment and rapid training of a significant number of personnel, which played a significant role in World War II. Recently, the methodology has gained attention as a tool for increasing the competitiveness of

enterprises. However, in the medium term, TWI could become a sought-after tool for maintaining economic momentum by ensuring the adaptation and interchangeability of personnel, especially for countries that have shown low birth rates in recent years and are filling the labor shortage by attracting migrants.

Keywords: training system, production organization, mentoring, management, quality, personnel shortage.

Предпосылкой начала развития производственного обучения является уход от ремесленно-ученической формы передачи знаний, а также вхождение в эпоху разделения труда в начале промышленной революции. Поскольку разделение труда показало эффективность, вопрос о качестве обучения в начале промышленной революции не имел острой необходимости в научном обосновании. Тем не менее, при работе над сложными и уникальными производственными задачами, вопрос подготовки рабочих становится ключевой возможностью для улучшения производственной системы.

Одной из наиболее эффективных концепций подготовки кадров для производства является «Training Within Industry» (TWI). Методика получила широкую огласку во время второй мировой войны в США и представляла из себя алгоритм последовательных шагов, включающих знакомство с инструктором, инструктаж на рабочем месте, повторение действий наставника и завершение инструктажа. Данная методика показала высокую эффективность и способствовала выполнению задачи снабжения техникой союзных войск в военные годы. [1]

Однако, при том, что как полноценная методика TWI сформировалась в США, ранее уже существовали предпосылки создания методики производственного обучения.

Для этого можно вспомнить опыт системы производственного обучения Н.И. Путилова, которая была применена еще в XIX веке. Путилов предложил обучать работников приёмам и операциям, из которых складывается процесс по изготовлению готовых изделий, непосредственно на производстве. Также важным элементом в системе Путилова было обязательное соблюдение последовательности по принципу «от простого к сложному». Система способствовала привлечению в трудоемкое производство, в том числе отрасли кораблестроения, большого числа работников без должной изначальной подготовки. [2]

Важным этапом в формировании системы производственного обучения стала система Д.К. Советкина. Система предполагала обучению отдельных трудовых операций в мастерских, после чего ученики переходили к изготовлению готовых изделий на производстве. Также особенностью системы было использование учебных карт и инструкций, что позволило повысить качество подготовки работников. [3]

Над принципами обучения также задумывался и основоположник современного менеджмента Фредерик Тейлор. Он предположил, что ответ-

ственность за планирование и организацию работы должна ложиться на административный центр, а рабочие вовлечены только в непосредственное выполнение трудовой операции. Кроме того, Тейлор предложил разбивать операции на элементы, ставить под вопрос каждый шаг, а также разрабатывать и внедрять улучшенный способ для каждого шага. [4]

Прорыв в становлении системы производственного обучения в 1919 году совершил Чарльз Аллен начал использовать четырехступенчатый метод обучения, включающий подготовку, демонстрацию операции, самостоятельное выполнение учеником и проверку умений. Метод показал эффективность в обучении работников предприятий кораблестроительной отрасти. Кроме того, Чарльз Аллен выделил роль наставника как основополагающий элемент эффективности обучения ученика. [5]

Большой прорыв в становлении системы обучения совершил А.К. Гастев. Он впервые обосновал важность научного подхода в разработке методов производственного обучения, основанных на естественных трудовых ритмах и биомеханике, а также трудовой культуре. [6]

В начале второй мировой войны руководство США понимало, что возможно большая часть опытных работников может быть вынуждена отправиться на фронт, где требуются технически грамотные кадры, включая ремонтников, слесарей и электриков. Кроме того, фронту требовались любые взрослые и здоровые мужчины, которые и составляли основу фабричных работников. В свою очередь для оказания помощи союзникам в снабжении припасами и военной техникой, потребуется привлечь значительное число работников, не имеющих должного производственного опыта, при этом они должны быть задействованы в том числе и производстве сложной техники такой как танки и самолеты.

По этой причине ещё 1940 году, ещё до вступления США во вторую мировую войну, была создана государственная служба производственного обучения (Служба TWI). Задачей службы TWI было помочь промышленности обучить рабочих, сформировать у них необходимый квалификационный уровень, способствуя, таким образом, удовлетворению военных требований. [7]

Методика TWI была сложена из лучшего опыта, в том числе и наработок Чарльза Аллена, получившими успех ещё во время первой мировой войны. Кроме того, в основу TWI легли три ключевые элемента: как инструктировать (JI), как улучшать процедуру (JM) и как поддерживать рабочие взаимоотношения (JR). [8]

Таким образом инструктаж, стал одним из трех столпов методики. Также, в отличие от инструктажа Аллена, в 40-х годах ввели разбивку операций на важные шаги, ключевые моменты и обоснования. Также важным этапом в становлении системы стало понимание необходимости обучения не только стажеров, но и самих инструкторов. Благодаря 10-чаовой программе опытный мастер знал не только «чему обучать», но и «как обучать».

Если в случае традиционной системы инструктажа работник недостаточно разобрался в процессе, что в последствии скажется на качестве его работы, то ответственность за плохие результаты ложится на работнике. В TWI случай, при котором работник не до конца понял инструктаж является следствием не качественной системы. Поэтому важным принципом, лежащим в основе методики TWI, представляет из себя то, что ответственность за обучение лежит на наставнике.

Ключевым элементом TWI стал акцент на поиск возможности улучшения процесса. Инструктор должен не просто разбить операцию на отдельные части, для обучения ученика, но также задать конкретные вопросы к каждой детали, выделить важные моменты, а также моменты, которые необходимо улучшить, оптимизировать или полностью исключить. После чего инструктор мог применять новый метод, предложив его начальству и обосновав выгоды от исключения потерь. Данный элемент методики во многом схож с бережливым производством и кайдзен, сформировавшимися позднее.

Также немаловажным открытием методики стало выделение трудовых отношений как одного из элементов TWI. Основой трудовых отношении в методике стала важность обратной связи с подчиненным, выделение положительных моментов, заблаговременном информировании, а также использование способностей и личных качеств.

За время войны программа смогла охватить более 16500 предприятий, что поспособствовало резкому подъему промышленности. Однако, после окончания войны и возвращения войск, TWI не получила дальнейшего развития в США и в последствии была частично забыта. [9]

Тем не менее, после победы союзников, американские специалисты уже в роли консультантов внедряли методику в странах Европы и Азии в рамках программы послевоенного восстановления промышленности. В особенности TWI была принята в Японии, где была высоко оценена и интегрирована в концепцию бережливого производства, что поспособствовало дальнейшему экономическому подъему страны. Методика TWI, как и бережливое производство подходило под многовековую культуру японцев. Если в США разработали метод, то в Японии собрали целостную программу к нему добавили системность и стандартизацию. [10]

В XXI веке методика, в том числе при помощи японских консультантов, стала проникать в передовые компании стран Европы и Азии, в том числе и в Китай, способствуя его интенсивному развитию. Во многом благодаря эффективности методики в Странах Азии, методика в последние годы получает свое новое рождение у продвинутых предприятий, стремящихся перенять лучший опыт. [11]

Таблица

Этапы развития систем производственного обучения

Событие	Годы	Страна
Система производственного обучения Н.И. Путилова	1854–1856	Российская империя
Система Д.К. Советкина	1870-е	Российская империя
Четырехступенчатый метод Чарльза Алена	1919	США
Центральный институт труда А.К. Гастев	1930-е	СССР
Служба TWI	1940–1945	США
Работа американцев в качестве консультантов в рамках программы восстановления промышленности стран Европы и Азии	1945–1950	Европа, Азия
Интеграция TWI в систему Кайдзен в компании «Тойота»	1950-е	Япония
Подъем интереса к бережливому производству и TWI	1990-е	Европа, США
Запуск института TWI	2002	США
Информационно-цифровое развитие систем обучения	2010-е	Европа, Азия, США

Для решения проблемы, вызванной дефицитом кадров следует опираться на уже проверенную многолетним опытом методику TWI, которая впитала в себя лучший опыт последовательного развития производственного обучения, начиная с промышленной революции. В настоящее время в мире сложилась ситуация, что специалисты в области TWI знают «как обучать», на что акцентируются многие предприятия, решившие внедрить методику. Однако не мало важный фактор для развития успешной модели производственного обучении это «чему обучать», на что делают акцент требования потребителей, однако ответ на данный вопрос хранится в знаниях и умениях опытных мастеров на производстве. Чтобы система была эффективной оба фактора, должны работать вместе.

Не смотря на существующие проблемы в большинстве развитых стран связанными с нехваткой кадров, данная тенденция в среднесрочной перспективе будет усугубляться во многом из-за низкой рождаемости. По этой причине обостряется вопрос трудовой миграции, однако привлеченная рабочая сила требует особого подхода в обучении. Кроме того, благодаря методики возможно обеспечить взаимозаменяемость среди внутренних резервов предприятий. Помимо прочего, методика в последнее время активно развивается в сфере услуг, здравоохранении, строительстве, а также других сферах общественной жизни, в которых также существует постоянная потребность в специалистах.

Таким образом, методика TWI в настоящее время находится на переходном этапе от инструмента повышения конкурентоспособности, используемого передовыми предприятиями, к способу сохранения темпов эконо-

мики на фоне трансформации социальных, демографических и политических процессов. Современные предприятия были вынуждены вспоминать лучший опыт прошлого во многом из-за ужесточения конкуренции. Однако сейчас для обращения к методики TWI, поводом скорее служат изменения общественного строя, вызванного сокращением местного населения и привлечением работников из других стран. В среднесрочной перспективе, методика может стать ещё более востребованной в странах, которые в настоящий момент показывают низкий уровень рождаемости и вынуждены привлекать иностранных специалистов, которые не всегда должным образом знакомы с современными требованиями стандартов и культурой бережливого производства.

Список литературы

1. Dietz W., Bevens B.W. Learn by doing. The story of Training Within Industry. Art Type Inc., Summit, N.J., 1970.
2. Куманев, Д. А. Путилов Иван Николаевич и его роль в создании Кировского завода / Д. А. Куманев // Вестник науки. – 2023. – Т. 1, № 11(68). – С. 713–719.
3. Фалько, С. Г. «Русский метод» как элемент «русской системы обучения ремеслам» / С. Г. Фалько // Инновации в менеджменте. – 2017. – № 1(11). – С. 2–3.
4. Taylor F. W. Scientific management. – Routledge, 2004.
5. Huntzinger J. The roots of lean //Training Within Industry: The Origin of Kaizen, Association for manufacturing Excellence. – 2002. – Т. 18. – №. 2. – С. 14–23.
6. Гастев А.К. Трудовые установки // Организация труда. Изд.1-е. Москва,1924. С. 478.
7. Dooley C. R. Training within industry in the United States //Int'l Lab. Rev. – 1946. – Т. 54. – С. 160.
8. Dooley C. R. The training within industry report 1940–1945 //Advances in Developing Human Resources. – 2001. – Т. 3. – №. 2. – С. 127–289.
9. Bianchi N., Giorcelli M. The dynamics and spillovers of management interventions: Evidence from the training within industry program //Journal of Political Economy. – 2022. – Т. 130. – №. 6. – С. 1630–1675.
10. Reubens B. G. Manpower training in Japan //Monthly Lab. Rev. – 1973. – Т. 96. – С. 16.
11. TWI в развитии производственных систем : Опыт лидеров Российской промышленности. Когда нужен результат / Сергей Смирнов. – [б. м.] : [б. и.], 2025. – 426 с.

Борисов И.С.
аспирант
Московский политехнический университет
Россия, Москва
ilya.skiya@ya.ru

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА НОВУЮ ТЕХНИКУ

Аннотация. В статье рассматривается проблема управления качеством процесса разработки нормативно-технической документации на новую технику в условиях усложнения производственных систем, роста требований к согласованности нормативных решений и цифровой трансформации стандартизации. Проблема особенно значима, поскольку в научной литературе основное внимание обычно уделяется либо развитию систем стандартизации в целом, либо вопросам цифровизации и менеджмента качества на макро- и мезоуровне, тогда как процесс разработки нормативно-технической документации на уровне предприятия как самостоятельный объект управления качеством раскрыт недостаточно. Цель статьи – обосновать подход к управлению качеством данного процесса. В работе использованы процессный подход, принципы систем менеджмента качества, логика цикла PDCA, а также сравнительный анализ публикаций по стандартизации, цифровизации нормативной среды и PLM-подходу. В результате выделены три группы ключевых проблем: фрагментарность работы с требованиями, ограниченная управляемость процедуры разработки и несоответствие традиционной документоцентричной модели условиям цифровой трансформации. Предложен подход, включающий процессную организацию разработки, управление требованиями и цифровую поддержку процесса. Сформирована система критериев оценки качества процесса разработки, охватывающая полноту, согласованность, актуальность, формализованность, управляемость, прозрачность и воспроизводимость. Предложенный подход может применяться на машиностроительных предприятиях при разработке нормативно-технической документации на новую технику и процессы ее производства.

Ключевые слова: управление качеством; процесс разработки; нормативно-техническая документация; новая техника; стандартизация; система менеджмента качества; цифровая трансформация; PLM.

Borisov I.S.
Postgraduate Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
ilya.skiya@ya.ru

QUALITY MANAGEMENT OF THE PROCESS OF DEVELOPING REGULATORY AND TECHNICAL DOCUMENTATION FOR NEW EQUIPMENT

Abstract. This article examines the problem of quality management in the development of regulatory and technical documentation for new equipment in the context of increasingly complex production systems, increasing demands for consistency in regulatory decisions, and the digital transformation of standardization. This issue is particularly significant because the scientific literature typically focuses on either the development of standardization systems in

general or digitalization and quality management issues at the macro- and meso-levels, while the process of developing regulatory and technical documentation at the enterprise level as an independent object of quality management remains insufficiently explored. The purpose of this article is to substantiate an approach to quality management for this process. The study utilizes a process approach, principles of quality management systems, the logic of the PDCA cycle, and a comparative analysis of publications on standardization, digitalization of the regulatory environment, and the PLM approach. Three groups of key problems are identified: fragmented requirements management, limited manageability of the development procedure, and the inadequacy of the traditional document-centric model for the conditions of digital transformation. An approach is proposed that incorporates a process-based development organization, requirements management, and digital process support. A system of criteria for assessing the quality of the development process has been developed, encompassing completeness, consistency, relevance, formalization, manageability, transparency, and reproducibility. The proposed approach can be applied at mechanical engineering companies when developing regulatory and technical documentation for new equipment and its production processes.

Keywords: quality management; development process; regulatory and technical documentation; new equipment; standardization; quality management system; digital transformation; PLM.

Разработка новой техники требует одновременного согласования конструкторских, технологических и нормативных решений. В этих условиях нормативно-техническая документация становится не только формой фиксации требований, но и инструментом обеспечения согласованности процессов проектирования, производства и контроля. Для новой техники такая документация выполняет не только регламентирующую, но и координирующую функцию: она связывает требования проектирования, производства, контроля и последующего применения изделия. Качество самой нормативно-технической документации и, в особенности, качество процесса ее разработки становятся существенным фактором устойчивости производственной системы и конкурентоспособности предприятия.

Анализ научных публикаций показал, что существующие исследования в основном сосредоточены на трех направлениях: развитии систем стандартизации, цифровой трансформации стандартизации и применении процессного подхода в системах менеджмента качества. При этом вопросы управления качеством именно процесса разработки нормативно-технической документации на уровне предприятия раскрыты фрагментарно. Однако значительная часть работ рассматривает либо систему стандартизации в целом, либо вопросы цифровой трансформации качества на макро- и мезоуровне, тогда как процесс разработки нормативно-технической документации на уровне предприятия как самостоятельный объект управления качеством раскрыт недостаточно. Это особенно заметно применительно к разработке документации на новую технику, где высока вероятность неполноты требований, рассогласования с конструкторской и технологической документацией, использования неактуальных источников и накопления изменений на поздних стадиях разработки.

Цифровая трансформация стандартизации меняет требования не только к форме нормативных документов, но и к процессу их разработки. Если ранее основной задачей было корректное текстовое оформление документа, то в цифровой среде возрастают требования к структурированности, прослеживаемости, управляемости версий и возможности интеграции требований в PLM-контур предприятия. Это означает, что качество процесса разработки нормативно-технической документации должно оцениваться не только по итоговому документу, но и по уровню формализованности, прослеживаемости, управляемости и воспроизводимости самого процесса

Важное место в этой трансформации занимают системы PLM, которые рассматриваются в современной литературе как организационно-цифровая среда, обеспечивающая интеграцию данных, процессов, участников и решений на протяжении всего жизненного цикла продукции. Исследования показывают, что PLM-системы выступают не только инструментом хранения и согласования информации, но и средством сокращения сроков разработки, улучшения управления изменениями, повышения согласованности проектных решений и цифровой интеграции различных подразделений предприятия. Следовательно, в контексте новой техники управление качеством процесса разработки нормативно-технической документации должно быть связано не только с традиционными процедурами согласования и нормоконтроля, но и с возможностями цифровой среды предприятия.

Цель статьи – обосновать подход к управлению качеством процесса разработки нормативно-технической документации на новую технику. В центре внимания находится не только итоговый документ, но и сама процедура его формирования, согласования, изменения и сопровождения. Практическая значимость связана с возможностью применения предложенного подхода на машиностроительных предприятиях при разработке документации на новую технику и процессы ее производства.

Методологическую основу исследования составляют положения процессного подхода, принципы систем менеджмента качества и современные представления о цифровой трансформации стандартизации. Исследование исходит из того, что процесс разработки нормативно-технической документации должен рассматриваться как совокупность взаимосвязанных этапов, имеющих входы, выходы, ответственных исполнителей, критерии завершения и механизмы обратной связи. Это дает возможность анализировать не только результат деятельности, но и сам процесс его получения. Важную роль в этой логике играет цикл PDCA, позволяющий связать планирование разработки документации, ее выполнение, проверку качества полученного результата и последующие корректирующие действия.

Методология исследования основана на сравнительном анализе научных публикаций по стандартизации, менеджменту качества, цифровизации нормативной среды и PLM-подходу. В ходе работы были выделены повторяющиеся проблемы разработки нормативно-технической документации,

сопоставлены подходы к их решению и на этой основе сформирована система критериев оценки качества процесса разработки. Анализ публикаций позволил выявить ключевые проблемы существующей практики разработки нормативно-технической документации на новую технику, включая дублирование требований, ограниченную прослеживаемость, слабую цифровую интеграцию и недостаточную управляемость изменений. На этапе методического построения использовались результаты исследований в области смарт-стандартов, цифровой зрелости стандартизации и PLM как цифровой среды жизненного цикла продукции.

Для оценки качества процесса разработки предложена система критериев, позволяющая описать как содержательную сторону документа, так и организационные характеристики самой процедуры его подготовки. Критериями оценки в рамках исследования выступают полнота формирования требований, их согласованность между собой и со смежной документацией, актуальность нормативной базы, степень формализации процедуры разработки, управляемость ее этапов, прослеживаемость изменений и воспроизводимость процесса. Использование этой системы критериев дает возможность перейти от общего описания процесса к его более строгой и сопоставимой оценке, а также выявлять этапы, требующие корректирующего воздействия.

Практическая реализация предложенного подхода опирается на инструменты управления требованиями и самой процедурой разработки. К ним относятся систематизация источников требований, установление прослеживаемых связей между требованиями и документацией, контроль полноты проекта документа, проверка внутренней согласованности положений, ведение актуальной базы нормативных ссылок, обработка замечаний, а также процедуры управления изменениями и мониторинга качества разработки. В совокупности это позволяет рассматривать процесс разработки нормативно-технической документации как объект постоянного совершенствования в контуре системы менеджмента качества предприятия.

Анализ отобранных публикаций позволил выделить три группы проблем, наиболее значимых для качества процесса разработки нормативно-технической документации на новую технику. К ним относятся фрагментарность работы с требованиями, ограниченная управляемость процедуры разработки и несоответствие традиционной документоцентричной модели условиям цифровой трансформации. Первая группа проблем связана с фрагментарностью работы с требованиями. Требования к новой технике, как правило, формируются из нескольких источников одновременно: исходного технического задания, конструкторской документации, производственных ограничений, накопленного опыта предприятия, а также требований действующей системы стандартизации. При отсутствии формализованного механизма объединения и проверки таких требований возрастает риск их неполного учета, дублирования или противоречивого включения в текст доку-

мента. Аналогичные риски отмечаются и в исследованиях по системам стандартизации, где подчеркивается необходимость повышения прозрачности и управляемости процедур формирования нормативных решений.

Вторая группа проблем связана с ограниченной управляемостью процесса разработки документации. На практике разработка стандарта организации или технических условий нередко остается зависимой от опыта конкретных исполнителей, а последовательность этапов, глубина проверки требований и характер согласования варьируются от случая к случаю. Это затрудняет воспроизводимость процесса, осложняет оценку его результативности и не позволяет в полной мере использовать подходы непрерывного совершенствования, принятые в системах менеджмента качества. Современные исследования в области менеджмента качества подчеркивают, что именно формализация процессов, определение входов и выходов, а также организация информационной поддержки позволяют перевести процедуру из разряда эпизодической деятельности в разряд управляемых процессов предприятия.

Третья группа проблем вызвана цифровой трансформацией промышленности и самой системы стандартизации. В условиях перехода к цифровым платформам, smart-стандартам, машиноориентированным форматам требований и интеграции данных жизненного цикла продукции традиционная документоцентричная модель разработки нормативно-технической документации оказывается недостаточной. Научные публикации последних лет показывают, что стандарты и требования все чаще рассматриваются как структурированные цифровые объекты, пригодные для интеграции в информационные системы, включая PLM-среду, а также для последующей автоматизированной проверки, поиска и управления изменениями. Это означает, что требования к качеству процесса разработки документации также изменяются: в центре внимания оказываются не только корректность текста, но и уровень цифровой готовности процесса, его трассируемость, совместимость с цифровой средой и способность к сопровождению изменений.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что разработка нормативно-технической документации на новую технику должна рассматриваться как самостоятельный объект управления качеством. Для этого требуется переход от оценки документа как завершенного результата к оценке качества самого процесса его формирования, согласования, актуализации и сопровождения.

Предлагаемый подход основывается на представлении разработки нормативно-технической документации как межфункционального процесса, встроенного в систему менеджмента качества предприятия. В отличие от традиционного подхода, при котором внимание сосредоточено на проверке уже подготовленного текста документа, в данном случае акцент переносится на ранние стадии: выявление и систематизацию требований, их согласование, формализацию этапов, контроль изменений и последующий мони-

торинг качества процесса разработки. Эта модель позволяет снизить вероятность дефектов на стадии подготовки проекта документа и сократить число поздних доработок.

Рассматриваемый подход включает три взаимосвязанных блока. Первый блок связан с процессной организацией разработки документации и включает выделение этапов, входов, выходов, зон ответственности и контрольных точек. Это обеспечивает воспроизводимость процедуры и позволяет рассматривать разработку документации как управляемый процесс. Второй блок связан с управлением требованиями и включает их систематизацию, проверку полноты, согласованности и актуальности. Третий блок связан с цифровой поддержкой процесса, то есть с возможностью интеграции нормативных требований в цифровую среду предприятия, прежде всего в контур PLM и информационной поддержки процессов качества.

Важным отличием предлагаемого подхода является включение оценки качества процесса в саму процедуру разработки. Иначе говоря, контроль качества рассматривается не как завершающий этап после подготовки документа, а как сквозной элемент всего процесса. На стадии планирования задаются критерии качества и целевые ориентиры, на стадии выполнения организуется формализованная работа с требованиями, на стадии проверки оценивается полнота и непротиворечивость проекта документа, а на стадии корректирующих действий устраняются причины повторяющихся несоответствий. Такая логика соответствует циклу PDCA и обеспечивает связь между выполнением конкретного проекта документа и совершенствованием процедуры разработки в целом.

Для практической реализации подхода качество процесса разработки нормативно-технической документации предлагается оценивать по системе критериев. В качестве базовых критериев качества процесса разработки предлагаются полнота формирования требований, их согласованность, актуальность нормативной базы, формализованность процедуры, управляемость, прозрачность и воспроизводимость (табл.). Выбор именно этих критериев связан с тем, что они позволяют оценить не только содержание документа, но и устойчивость самой процедуры его подготовки.

Таблица

Критерии оценки качества процесса разработки нормативно-технической документации на новую технику

№	Критерий качества	Содержание
1	*2*	*3*
1	Полнота формирования требований	Характеризует степень охвата нормативных, технических и производственных требований при разработке нормативно-технической документации, а также учет параметров технического задания и условий эксплуатации новой техники

Окончание табл.

1	*2*	*3*
2	Согласованность	Отражает степень согласованности требований нормативно-технической документации между собой и их увязку с конструкторской документацией, обеспечивающую однозначность интерпретации
3	Актуальность нормативной базы	Характеризует степень учета действующих нормативно-технических требований и своевременность их актуализации в процессе разработки документации
4	Формализованность процесса разработки	Отражает наличие регламентированных этапов, процедур, правил согласования и распределения ответственности в процессе разработки документации
5	Управляемость процесса разработки	Характеризует возможность планирования, контроля, корректировки и координации процесса разработки документации в рамках системы управления качеством предприятия
6	Прозрачность процесса разработки	Определяет степень прослеживаемости этапов разработки, принимаемых решений, замечаний и вносимых изменений
7	Воспроизводимость процесса	Отражает возможность повторного применения установленного порядка разработки документации при создании новой техники и ее модификаций

Представленная система критериев позволяет оценивать качество процесса разработки нормативно-технической документации одновременно в двух измерениях: по содержательной проработанности требований и по степени организационной упорядоченности самой процедуры разработки. Соответствующее построение системы критериев дает возможность не только фиксировать общее состояние процесса, но и выявлять его наиболее уязвимые элементы, требующие управленческого воздействия.

Для перехода от качественного описания к количественной оценке каждому критерию сопоставляется частный показатель, нормируемый в едином интервале. Это обеспечивает сопоставимость разнородных характеристик процесса и позволяет агрегировать их в интегральную оценку. Для агрегирования показателей предлагается использовать мультипликативный подход, поскольку он лучше отражает системный характер процесса разработки: критически низкое значение одного из критериев не может быть полностью компенсировано высокими значениями остальных. Такая логика особенно важна применительно к нормативно-технической документации, где, например, высокая полнота требований не компенсирует отсутствие их согласованности или прослеживаемости.

Использование интегрального показателя качества процесса разработки дает несколько практических эффектов. Во-первых, появляется возможность сравнивать качество различных циклов разработки документации. Во-вторых, становится возможным выявление наиболее проблемных критериев и этапов процесса. В-третьих, создается количественная база для постановки целевых значений и последующего мониторинга результативности улучшений. Следовательно, система критериев и показателей высту-

пает не просто средством диагностики, а элементом управленческого механизма совершенствования процесса разработки нормативно-технической документации.

Практическая реализация управления качеством процесса разработки требует набора специальных инструментов, обеспечивающих работу с требованиями, изменениями и результатами согласования. В составе предлагаемого подхода такими инструментами выступают: матрица источников требований, карта трассируемости требований, чек-лист полноты, матрица согласованности, реестр нормативных ссылок, лист согласования замечаний, а также процедуры управления изменениями и регламент мониторинга качества процесса разработки.

Матрица источников требований используется для упорядочения исходной информации и позволяет установить, из какого источника поступает каждое требование и в каком разделе разрабатываемого документа оно должно быть отражено. Карта трассируемости служит для прослеживания связи между исходными требованиями, конкретными положениями документа, а также конструкторской и технологической документацией. Чек-лист полноты помогает контролировать наличие обязательных разделов и положений, тогда как матрица согласованности позволяет выявлять противоречия как внутри документа, так и в его связях со смежной документацией. Реестр нормативных ссылок используется для контроля актуальности применяемых источников, а лист согласования замечаний обеспечивает упорядоченную работу с экспертными комментариями и доработками.

При разработке новой техники нормативно-техническая документация неизбежно уточняется по мере изменения конструкции изделия, технологии производства, условий эксплуатации и исходных требований. По этой причине каждое изменение должно проходить не только фиксацию, но и последовательную процедуру анализа, корректировки, повторного согласования и последующего учета в системе мониторинга. Это позволит избежать накопления несогласованных правок и поддерживать соответствие документа текущему состоянию изделия и производственного процесса.

Контур практической реализации замыкает мониторинг качества процесса разработки. Он основывается на расчете частных и интегрального показателей, сопоставлении фактических значений с целевыми, фиксации отклонений и подготовке корректирующих действий. Благодаря этому процесс разработки нормативно-технической документации получает встроенный механизм обратной связи и становится частью контура непрерывного совершенствования системы менеджмента качества предприятия.

Проведенное исследование позволяет рассматривать разработку нормативно-технической документации на новую технику как самостоятельный объект управления качеством. Обосновано, что качество такого процесса определяется не только характеристиками итогового документа, но и полнотой, согласованностью, актуальностью, управляемостью и воспроизводимостью самой процедуры разработки.

Предлагаемый подход ориентирован на повышение полноты, согласованности и управляемости процесса разработки, а также на его последующую интеграцию в цифровую среду предприятия. Его применение позволяет повысить прозрачность разработки нормативно-технической документации, снизить риск несогласованных требований и создать основу для совершенствования процедуры разработки в контуре системы менеджмента качества предприятия.

Более перспективным направлением дальнейшей работы является интеграция предложенного подхода в цифровую среду предприятия и использование PLM-инструментов для сопровождения требований на протяжении жизненного цикла новой техники.

Список литературы

1. Борисов И. С., Васильев В. А. Совершенствование системы стандартизации в области подтверждения соответствия самоходных машин и прицепов к ним // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – № 2.
2. Борисов И. С. Роль цифровых технологий в разработке стандартов и технических условий для новой техники // Качество. Инновации. Образование. – 2025 – № 2. – С. 40–48.
3. Balashova E. S., Malyshev E. A., Vasilieva S. A. Application of the quality management system in the context of the effective operation of complex industrial systems // π-Economy. – 2022. – Vol. 15, No. 6. – P. 100–112.
4. Алексашкина Е. И. и др. Применение зарубежного опыта оценки деятельности системы стандартизации в российской практике // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2021. – № 1. – С. 103–112.
5. Макаров В. В., Волчик О. В. Особенности разработки и применения смарт-стандартов как основы реализации концепции «Качество 4.0» // Журнал правовых и экономических исследований. – 2023. – № 3. – С. 285–289.
6. Саламатов В. Ю. и др. Цифровая трансформация в сфере стандартизации для повышения международной конкурентоспособности России // Российский внешнеэкономический вестник. – 2023. – № 6. – С. 7–29.
7. Бобровский С. М. Разработка структуры процессов системы управления качеством предприятия совместно с системой информационной поддержки процессов управления качеством // Известия Самарского научного центра РАН. – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 13–19.
8. Калашникова С. П., Добрин К. Ю. Цифровая трансформация менеджмента качества в современных условиях // Гуманитарный научный журнал. – 2023. – № 4–1. – С. 44–48.
9. Duda J., Oleszek S., Santarek K. The impact of PLM systems on the digital transformation of manufacturing companies // Manufacturing 2024: International Scientific-Technical Conference. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2024. – P. 151–164.
10. Aberkane M. S., Otman A. Product lifecycle management: what sectors and what technologies used? A systematic literature review // Discover Sustainability. – 2025. – Vol. 6, No. 1. – Art. 730.

Хандорина А.С.
студент
Московский политехнический университет
Россия, Москва
aleksa07_94@mail.ru
Алексашина О.В.
к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Svirukova@yandex.ru

УПРАВЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЕЙ В ПРОЕКТЕ КАК НЕОТЪЕМЛЕМАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА

Аннотация. Данная статья подробно раскрывает специфику управления конфигурацией (УК) как критически важного процесса в рамках жизненного цикла современных наукоемких систем. Основной акцент на том, что в условиях возрастающей сложности технологических решений и необходимости интеграции разнородных компонентов, систематизация данных о состоянии объектов становится ключевым фактором успеха. В тексте детально разбираются фундаментальные принципы идентификации, контроля, мониторинга и аудита конфигурационных единиц, которые позволяют сформировать целостную и достоверную информационную базу. Особое внимание уделяется анализу практических преимуществ внедрения методологии УК, среди которых выделяются минимизация операционных рисков, сокращение временных затрат на устранение несоответствий и обеспечение прозрачности изменений для всех участников процесса. Работа демонстрирует эволюцию подходов к управлению – от простых репозиториев кода до комплексных систем управления жизненным циклом продукта (PLM). Заключительная часть аннотации подчеркивает стратегическую значимость дисциплины для достижения высокого уровня качества и надежности в цифровой индустрии. Материал будет полезен системным инженерам, руководителям ИТ-проектов и специалистам по обеспечению качества, стремящимся к оптимизации внутренних производственных стандартов и повышению общей конкурентоспособности организации через внедрение передовых практик менеджмента конфигураций.

Ключевые слова: управление конфигурацией, жизненный цикл, менеджмент качества, информационные системы, управление изменениями, проектное управление.

Khandorina A.S.
Student
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
aleksa07_94@mail.ru
Aleksashina O.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Standardization, Metrology, and Certification
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
Svirukova@yandex.ru

CONFIGURATION MANAGEMENT IN A PROJECT AS AN INTEGRAL PART OF THE MANAGEMENT SYSTEM

Abstract. This article explores the specifics of configuration management (CM) as a critical process within the lifecycle of modern knowledge-intensive systems. It emphasizes that, given the increasing complexity of technological solutions and the need to integrate disparate components, systematization of data on the state of objects is becoming a key success factor. The text thoroughly examines the fundamental principles of identifying, controlling, monitoring, and auditing configuration items, which enable the creation of a comprehensive and reliable information base. Particular attention is paid to analyzing the practical benefits of implementing CM methodology, including minimizing operational risks, reducing the time spent on resolving inconsistencies, and ensuring change transparency for all process participants. The work demonstrates the evolution of management approaches–from simple code repositories to comprehensive product lifecycle management (PLM) systems. The concluding section of the abstract emphasizes the strategic importance of this discipline for achieving high levels of quality and reliability in the digital industry. This material will be useful for systems engineers, IT project managers, and quality assurance specialists seeking to optimize internal production standards and improve the overall competitiveness of their organizations through the implementation of best practices in configuration management.

Keywords: configuration management, lifecycle, quality management, information systems, change management, project management.

В условиях стремительного усложнения технологических процессов и информационных систем вопросы обеспечения целостности продукта выходят на первый план. Управление конфигурацией (УК) перестало рассматриваться исключительно как техническая дисциплина в рамках ИТ-проектов и трансформировалось в стратегический инструмент менеджмента. Согласно ГОСТ Р ИСО 10007-2019, управление конфигурацией является деятельностью, направленной на установление и поддержание в контрольном состоянии характеристик продукции на протяжении всего её жизненного цикла.

Теоретические основы управления конфигурацией в системе менеджмента

Система менеджмента любой организации ориентирована на минимизацию рисков и повышение предсказуемости результатов. Управление конфигурацией обеспечивает необходимую прозрачность, позволяя идентифицировать каждый компонент сложной системы, будь то аппаратное обеспечение, программный код или техническая документация.

Карл Вигерс в своих работах подчеркивает, что без четко выстроенной дисциплины управления конфигурацией невозможно качественное управление требованиями. Любое изменение в требованиях влечет за собой каскад изменений в архитектуре, коде и тестах. Если эти связи не зафиксированы в рамках конфигурационных единиц, проект неизбежно сталкивается с проблемой неконтролируемого разрастания границ и потери качества.

Структура процесса управления конфигурацией

Стандарт ISO/IEC/IEEE 15288 определяет управление конфигурацией как один из ключевых процессов жизненного цикла системы. Классическая модель процесса включает четыре основных элемента.

✓ Идентификация конфигурации. Определение структуры системы, выбор составных частей (конфигурационных единиц) и присвоение им уникальных идентификаторов.

✓ Контроль конфигурации. Управление изменениями. Именно на этом этапе менеджмент принимает решения о целесообразности внесения правок, оценивая их влияние на сроки, бюджет и качество.

✓ Учет статуса конфигурации. Регистрация и отчетность о состоянии каждой конфигурационной единицы. Это позволяет в любой момент времени получить «срез» системы (baseline).

✓ Верификация и аудит. Проверка соответствия физического воплощения системы её документальному описанию.

Как отмечает С.В. Миронов, для сложных технических систем аудит конфигурации становится критическим фактором безопасности, гарантирующим, что в итоговый продукт не попали несанкционированные или непроверенные компоненты.

Роль УК в управлении изменениями и жизненным циклом

Современные методологии разработки, такие как Agile и Kanban, предполагают высокую частоту изменений. Д. Андерсон указывает, что использование Канбан-систем позволяет визуализировать поток работ, однако стабильность этого потока напрямую зависит от того, насколько эффективно управляются версии продукта.

Управление конфигурацией выступает связующим звеном между этапами проектирования, разработки, эксплуатации и утилизации. В работах Ю.В. Волкова подчеркивается, что архитектура информационной системы должна изначально проектироваться с учетом возможности гибкого управления изменениями. Это предотвращает возникновение «технического долга» и упрощает масштабирование систем в долгосрочной перспективе.

Инструментальная поддержка и автоматизация

В цифровой экономике ручное управление конфигурацией невозможно. А.С. Кулябин выделяет ряд инструментальных средств (CASE-средства, системы контроля версий, PLM-системы), которые автоматизируют рутинные операции по отслеживанию зависимостей. Применение таких инструментов позволяет:

- снизить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором;
- обеспечить мгновенный доступ к истории изменений для всех участников проекта;
- автоматизировать процесс сборки и развертывания систем (Continuous Integration / Continuous Deployment).

Интеграция с системой менеджмента качества (СМК)

Управление конфигурацией является важной опорой для стандартов серии ИСО 9000. В контексте менеджмента качества УК обеспечивает прослеживаемость – возможность восстановить историю создания любого элемента продукта. Это необходимо не только для устранения дефектов, но и для непрерывного совершенствования процессов.

Эффективная СМК требует, чтобы все проектные решения были задокументированы и согласованы. У. Хамфри в своих исследованиях дисциплины управления проектами доказывает, что организации с высоким уровнем зрелости процессов управления конфигурацией демонстрируют на 30–40% меньшее количество дефектов на этапе эксплуатации программных комплексов.

Проблемы внедрения и пути их решения

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение системы управления конфигурацией сталкивается с рядом барьеров:

- сопротивление персонала из-за усложнения бюрократических процедур;
- высокая стоимость специализированного ПО;
- недостаток квалифицированных кадров, понимающих специфику системной инженерии.

Для преодоления этих проблем А.С. Козлов рекомендует использовать итерационный подход к проектированию систем управления проектами. Начинать следует с наиболее критичных компонентов, постепенно расширяя область контроля на все активы организации.

Управление конфигурацией – это не просто техническая функция, а фундамент современной системы менеджмента. Оно обеспечивает «единую версию правды» для всех стейкхолдеров проекта, снижает риски рассогласования компонентов и гарантирует соответствие конечного продукта заданным требованиям. В условиях цифровой трансформации и перехода к Индустрии 4.0 роль УК будет только возрастать, становясь обязательным условием конкурентоспособности и надежности любых сложных систем.

Список литературы

1. Вигерс К., Джой Б. Разработка требований к программному обеспечению. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019.
2. Миронов С. В. Практика управления конфигурацией сложных технических систем. – М.: Техносфера, 2021.
3. ГОСТ Р ИСО 10007-2019. Менеджмент качества. Руководящие указания по управлению конфигурацией.
4. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 Systems and software engineering – System life cycle processes.
5. Кулябин А. С. Инструментальные средства поддержки жизненного цикла ИС. – Екатеринбург: УрФУ, 2021.
6. Волков Ю. В. Архитектура информационных систем и управление изменениями. – Новосибирск: НГТУ, 2021.

7. Андерсон Д. Канбан: Альтернативный путь в Agile. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2019.
8. Хамфри У. Дисциплина управления программными проектами. – М.: Изд-во Института системного программирования РАН, 2018.
9. Козлов А. С. Проектирование систем управления проектами. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022.

Шкробова В.И.
ведущий специалист по интегрированной системе менеджмента
АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания»
Россия, Хабаровск
v.i.shkrobova@gmail.com

ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К НЕСООТВЕТСТВИЯМ В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Аннотация. Анализ причинно-следственных связей – одна из ключевых управленческих задач любой организации. Понимание корневых причин несоответствий и учет всех факторов, которые вызывают несоответствия или потенциально могут способствуют их наступлению, означают готовность компаний быстро и правильно управлять изменениями в системе. В то же время на практике выявляется, что причины не всегда анализируются до уровня корневых, а прописываются в формулировке поверхностных, очевидных. Смежной проблемой отметим, что при анализе причин несоответствий зачастую рассматриваются не все факторы, приводящие к возникновению несоответствия, а лишь те, которые кажутся наиболее вероятными и правильными. В настоящей работе приводятся группы факторов, на которые целесообразно обращать внимание при анализе СМК, но которые редко анализируются в качестве возможных причин несоответствий. Также в работе акцентируется внимание на необходимости выполнять корректирующие и предупреждающие действия, предполагающие воздействие на причины проблемы, и не ограничиваться коррекцией, то есть простым устранением выявленного несоответствия. Основная задача работы – показать разнообразие возможных причин возникновения тех или иных несоответствий в организациях. В то же время приведенные факторы не должны использоваться организациями в качестве шаблонных, поскольку каждое несоответствие вызвано своими собственными причинами.

Ключевые слова: несоответствие, корневая причина, анализ СМК, определение причин несоответствий, корректирующее действие.

Shkrobova V.I.
Leading Specialist in Integrated Management Systems
Far Eastern Distribution Grid Company JSC
Russia, Khabarovsk
v.i.shkrobova@gmail.com

FACTORS LEADING TO INCONSISTENCIES IN THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

Abstract. Cause-and-effect analysis is a key management task for any organization. Understanding the root causes of nonconformities and considering all factors that cause or

potentially contribute to nonconformities means companies are prepared to quickly and effectively manage system changes. At the same time, in practice, it becomes clear that root causes are not always analyzed, but rather are presented as superficial and obvious. A related issue is that when analyzing the causes of nonconformities, not all factors leading to the occurrence of the nonconformity are often considered, but only those that seem most probable and appropriate. This paper presents groups of factors that are appropriate to consider when analyzing the QMS, but which are rarely analyzed as possible causes of nonconformities. The paper also emphasizes the need to implement corrective and preventive actions that address the root causes of the problem, rather than simply correcting the identified nonconformity. The main objective of the paper is to demonstrate the diversity of possible causes for various nonconformities in organizations. At the same time, the factors cited should not be used as templates by organizations, as each nonconformity has its own unique causes.

Keywords: non-conformity, root cause, QMS analysis, determination of causes of non-conformities, corrective action.

При выявлении несоответствия (то есть при обнаружении факта невыполнении требований) организация должна осуществить следующие действия, согласно ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [1]:

- выполнить коррекцию, которая предполагает устранение непосредственно выявленного несоответствия,
- осуществить корректирующие действия, что заключается в устранении причины возникновения несоответствия,
- составить предупреждающие действия, представляющие собой мероприятия, направленные на недопущение данного несоответствия в будущем.

Коррекция практически всегда предполагает максимально оперативные изменения, однако не может гарантировать, что несоответствие не повторится в дальнейшем. Более того, коррекция не требует оценки причин, то есть понимания природы возникновения проблемы. Это означает, что несоответствие не находится под управлением. Анализ причинно-следственных связей в системе позволяет сократить количество повторных несоответствий, предупредить наступление нежелательных событий, а также грамотно работать с уже наступившими проблемами.

Таким образом, анализ системы менеджмента путем определения причинно-следственных связей событий (в частности, наступивших или потенциальных несоответствий) – это набор удобных и универсальных инструментов качества, с помощью которого компании могут сокращать потери, управлять издержками, оценивать возможности и риски. Однако на практике не все организации в полной мере занимаются анализом причин несоответствий, из-за чего в их системах управления возникают несоответствия, которых можно было бы избежать, применяя инструменты и методы поиска причин. Таких инструментов существует достаточно много [2], но одними из наиболее распространенных можно назвать метод «5 почему» и диаграмму Исикавы «рыбий скелет».

Проблема неприменения методов является комплексной и заключается не только в недостаточном умении использовать данные инструменты, но и в поверхностном анализе тех факторов, которые могут привести или привели к возникновению несоответствия.

Настоящая статья не рассматривает, как правильно применять данные инструменты, но приводит перечень факторов, которые целесообразно учитывать при анализе причин несоответствий в СМК организации. Данный перечень сформирован с учетом практического опыта и изучения теоретической базы.

Цель работы: обозначить группы факторов, которые рекомендуется учитывать при анализе причин несоответствий в СМК организации.

При подготовке настоящей работы отмечено, что при выявлении несоответствия в ряде компаний в качестве причины приводятся следующие формулировки:

- недосмотр персонала,
- недостаточный контроль,
- человеческий фактор.

Данные причины некорректны с точки зрения СМК, поскольку:

1) не являются корневыми, а именно не указывают основу, природу происхождения проблемы,

2) носят характер частных причин [3], то есть предполагают, что проблема заключается в персонале – выполняющем работу или осуществляющим контроль выполнения,

3) являются совокупностью каких-либо обстоятельств, суммарно приведших к наступлению несоответствия.

Неверно будет в качестве корректирующих действий в данных случаях указывать такие как «быть внимательнее», «усилить контроль», «не допускать возникновение несоответствия». Скорее всего, такие размытые формулировки, не отражающие системные изменения, не приведут к устранению проблемы, и вероятнее всего несоответствие повторится.

Метод «5 почему» не указывает, на какие группы факторов необходимо обращать внимание при поиске причин, но его основным преимуществом является возможность определения корневой причины, которая является ответом на последнее «почему?» (обычно пятое, но иногда второе, третье, седьмое).

Диаграмма Исикавы «рыбий скелет» [4] иногда называется диаграммой 5М. Она представляет собой анализ корневых причин по пяти категориям (группам) факторов, начинающихся в английском языке с буквы М: методы, материалы, люди, окружающая среда, измерения. В зависимости от сложности несоответствия количество групп факторов может варьироваться в меньшую или большую сторону. Однако отметим, что данные категории достаточно размыты, в связи с чем работникам, недостаточно опытным в сфере анализа причин несоответствий и не слишком хорошо применяющим

на практике диаграмму Исикавы, сложно применять данный инструмент качества. Таким образом, приведенный перечень предполагает помощь персоналу организаций при поиске причин несоответствий.

В то же время, чем серьезнее несоответствие и чем сложнее определить причину его возникновения, тем большее число факторов следует проанализировать. На предприятиях одной из проблем определения причин несоответствий являются затруднения, какие именно факторы необходимо принять во внимание.

Перечень факторов, которые целесообразно принимать во внимание при анализе причин несоответствий в области СМК:

1. Обстоятельства во внешней и внутренней среде в период возникновения несоответствия и перед этим: экономическая, политическая обстановка, социальные изменения.

2. Законодательство, внутренняя и внешняя нормативная документация организации: были ли изменения, соблюдены ли, не было ли противоречий между документами.

3. Степень документированности процесса: все ли процедуры описаны, в полном ли объеме, отсутствуют ли противоречия между документами, актуальны ли требования.

4. Правильность и корректность внутренних и внешних требований, в том числе понимание персоналом данных требований, доведены ли они, имеются ли стандарты и процедуры в отношении данного несоответствия.

5. Время года и суток, погодные условия, географическое расположение места возникновения несоответствия.

6. Степень влияния автоматизации, цифровизации, Изменения научно-технического прогресса: не было ли смены программного обеспечения, применяется ли искусственный интеллект (в каком объеме, проверяется ли информация людьми).

7. Качество закупаемого материала, сырья, инструмента: не было ли смены поставщика, стабильны ли процессы СМК в компании-поставщике.

8. Менталитет и корпоративная культура: учтены ли социокультурные особенности людей, участвующих в данном процессе СМК.

9. Сроки выполнения задач, их сложность, количество человек, задействованных в процессе, нет ли заведомо невыполнимых задач – с малыми сроками или предполагающих более высокую квалификацию.

10. Является ли несоответствие связанным с внешним потребителем (например, речь идет о письменной жалобе в адрес компании или отзыве в сети интернет).

11. Стаж работы и опыт сотрудников, задействованных в процессе, наличие системы наставничества и консультирования, порядка периодической проверки знаний и повышения квалификации.

12. Условия труда: безопасность, комфорт, наличие мест отдыха.

13. Наличие требований к оборудованию, средствам измерений, инструментам, материалам.

14. Оценка управления знаниями и накопленным опытом: имеется ли база данных по аналогичным ситуациям, что было указано причиной несоответствия в предыдущий раз, верно ли была определена причина, не является ли текущее несоответствие точным повторением первого.

15. Комплексная оценка процесса, внутри которого произошло несоответствие, или процессов, на стыке которых оно произошло – нестабильные процессы предполагают большее количество несоответствий, чем устойчивые.

16. Иные факторы в зависимости от СМК организации и ее контекста.

Перечень факторов, подлежащих анализу, зависит от конкретного несоответствия, возникшего в конкретной организации в определенный момент времени с определенными людьми при реализации определенного процесса СМК. В статье предложены лишь некоторые факторы, которые следуют рассматривать при анализе причинно-следственных связей в СМК организаций. Данный список не завершается перечисленными факторами, но показывает, какое многообразие обстоятельств следует учитывать при поиске причин, не ограничиваясь распространенными, но не всегда корректными причинами, указанными в начале статьи.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования».
2. Давыдов, В.М. Методы определения причин несоответствий процесса установленным требованиям / В.М. Давыдов, В.И. Шкробова // Информационные технологии XXI века : сборник научных трудов. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2023. – С. 281–288.
3. Деминг Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Эдвардс Деминг; пер. с англ. 3-е изд. М.: Альпина Паблишер. 2009. 419 с.
4. Егоров, М.К. Анализ причин появления несоответствующей продукции на примере диаграммы Исикавы / М.К. Егоров // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее: сборник научных статей 2-й Всероссийской научной конференции, Курск, 17–18 октября 2019 года / Юго-Западный государственный университет, Московский политехнический университет, Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 55–58.

Елисеева Н.В.
к.т.н., доцент кафедры «Управления и информатики в технических системах»
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
n.eliseeva@stankin.ru
Кайкова Ю.В.
аспирант
МГТУ «СТАНКИН»
Россия, Москва
kaykova.yulia@gmail.com

ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА: ВИЗУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОДЕЛЯМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В условиях экспоненциального роста объёмов неструктурированных наукометрических данных традиционные аналитические подходы демонстрируют ограниченную эффективность при решении задач семантического анализа и прогнозирования технологических трендов. Тематическое моделирование на базе нейронных сетей и вероятностных алгоритмов позволяет автоматизированно извлекать скрытые смысловые структуры из массивов публикаций, патентов и метаданных исследователей, однако сталкивается с двумя системными ограничениями: высокой нестабильностью формирования тем при повторных запусках и отсутствием прозрачности принимаемых моделью решений. В настоящей работе предложен подход к цифровому контролю качества моделей машинного обучения посредством внедрения визуальной интегрированной среды управления. Архитектура системы охватывает полный жизненный цикл аналитического конвейера: от предобработки и фильтрации для устранения шума до интерактивной настройки гиперпараметров, мониторинга динамики обучения и визуализации причинно-следственных связей. Ключевым отличием разработанного инструмента является реализация экспертно-ориентированного интерфейса, позволяющего специалистам предметной области без глубоких знаний в области программирования корректировать параметры, оценивать промежуточные метрики и перезапускать итерации обучения в режиме реального времени. Предложенная методология формирует основу для построения прозрачных аналитических платформ, применяемых научными фондами, университетами и технологическими кластерами при оценке зрелости исследовательских направлений и стратегическом планировании.

Ключевые слова: тематическое моделирование, объяснимый искусственный интеллект, визуальное управление моделями, наукометрический анализ, интегрированная среда разработки машинного обучения, контроль качества данных, интерпретируемость моделей.

Eliseeva N.V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Control and Informatics in Technical Systems
MSTU «STANKIN»
Russia, Moscow
n.eliseeva@stankin.ru
Kaykova Yu.V.
Postgraduate Student
Moscow State University of Technology «STANKIN»
Russia, Moscow
kaykova.yulia@gmail.com

DIGITAL QUALITY CONTROL METHODS: VISUAL GUIDANCE OF MACHINE LEARNING MODELS FOR TOPIC MODELING

Abstract. With the exponential growth of unstructured scientometric data, traditional analytical approaches demonstrate limited effectiveness in solving problems of semantic analysis and forecasting technological trends. Topic modeling based on neural networks and probabilistic algorithms enables the automated extraction of hidden semantic structures from large volumes of publications, patents, and research metadata, but faces two systemic limitations: high instability in topic formation during repeated runs and a lack of transparency in model

decisions. This paper proposes an approach to digital quality control of machine learning models through the implementation of a visual integrated management environment. The system architecture encompasses the entire lifecycle of the analytical pipeline: from preprocessing and filtering to remove noise to interactive hyperparameter tuning, monitoring training dynamics, and visualizing cause-and-effect relationships. A key distinguishing feature of the developed tool is the implementation of an expert-oriented interface, allowing subject matter experts without in-depth programming knowledge to adjust parameters, evaluate intermediate metrics, and restart training iterations in real time. The proposed methodology forms the basis for the construction of transparent analytical platforms used by scientific foundations, universities, and technology clusters in assessing the maturity of research areas and strategic planning.

Keywords: topic modeling, explainable artificial intelligence, visual model management, scientometric analysis, machine learning integrated development environment, data quality control, model interpretability.

Современная наука генерирует колоссальные объёмы текстовой информации, включающей рецензируемые публикации, патентные описания, отчёты о выполнении государственных программ и данные о международных коллаборациях. Эффективное управление научной деятельностью, прогнозирование технологических сдвигов и оценка зрелости исследовательских экосистем требуют перехода от описательной статистики к семантическому анализу скрытых смысловых структур. В последние десятилетия тематическое моделирование зарекомендовало себя как один из наиболее перспективных методов автоматизированного выявления латентных тем в неструктурированных корпусах текстов [1]. Интеграция нейросетевых архитектур с вероятностными подходами (например, нейронные вариации LDA, BERTopic, Top2Vec) позволила повысить качество выделения смысловых кластеров и учесть контекстуальную зависимость лексики [2].

Несмотря на очевидные преимущества, практическое внедрение данных алгоритмов в аналитические процессы сталкивается с двумя фундаментальными барьерами. Во-первых, результаты тематического моделирования демонстрируют высокую чувствительность к начальным условиям: незначительные изменения в выборке, порядке токенов или значениях гиперпараметров приводят к радикально различным семантическим разбиениям [3]. Во-вторых, современные модели машинного обучения функционируют по принципу «чёрного ящика»: на вход подаются наукометрические метаданные, на выходе формируется граф тем или распределение вероятностей, однако механизм принятия внутренних решений остаётся непрозрачным даже для разработчиков [4]. В отличие от классических экспертных систем (онтологий, семантических сетей, фреймов), где логика вывода явно закодирована и верифицируема, нейросетевые модели требуют дополнительных инструментов обеспечения объяснимости [5].

Отсутствие интерпретируемости критически ограничивает применение тематических моделей в стратегическом управлении наукой, где требуется

не только классификация, но и обоснование принимаемых решений. Решение данной задачи лежит в плоскости разработки визуальных сред, объединяющих вычислительную мощность алгоритмов с когнитивными возможностями эксперта. В настоящей статье представлена методология цифрового контроля качества моделей машинного обучения, основанная на визуальном управлении процессом обучения тематических моделей. Особое внимание уделяется архитектуре интегрированной среды IDEML, которая трансформирует линейный процесс обучения в интерактивный диалог между алгоритмом и специалистом предметной области. Цель работы заключается в обосновании и реализации методологии визуального управления моделями машинного обучения, в рамках которой визуализация промежуточных состояний, динамическая настройка гиперпараметров и экспертная верификация результатов выступают системными инструментами повышения устойчивости, полноты и объяснимости семантического анализа наукометрических данных.

Разработанная методология базируется на трёх последовательных этапах: сбор и структурирование наукометрических данных, алгоритмическое тематическое моделирование с визуальным управлением, итеративная экспертная верификация. Источником первичной информации выступают агрегированные базы Scopus и Web of Science, содержащие метаданные публикаций: авторов, аффилиации, ключевые слова, индексы цитирования, даты выхода, названия журналов и грантовую привязку. Для обеспечения репрезентативности корпуса применяется стратифицированная выборка, учитывающая временные срезы, дисциплинарные кластеры и географическое распределение исследовательских групп [6].

Предобработка текстовых массивов реализуется в модуле лемматизации и фильтрации шума. На данном этапе осуществляется нормализация морфологических форм, удаление стоп-слов, специфичных для научного дискурса, и исключение редких токенов, не несущих семантической нагрузки. Дополнительно выделяются устойчивые ключевые фразы (n-grams) с использованием статистических мер ассоциации (TF-IDF, Pointwise Mutual Information), что позволяет сохранить терминологическую целостность предметных областей [7]. Результатом предобработки является векторизованный корпус, готовый к подаче в тематическую модель.

Ядром методологии выступает визуальная интегрированная среда IDEML, спроектированная по аналогии с классическими IDE для разработки программного обеспечения, но адаптированная под жизненный цикл машинного обучения. Система состоит из трёх функциональных страниц, обеспечивающих сквозной контроль качества:

Модуль предобработки и параметризации выбора метода. Пользователь визуально настраивает пороги фильтрации, выбирает алгоритм тематического моделирования (латентное размещение Дирихле, нейросетевые эмбеддинговые подходы, гибридные архитектуры) и задаёт начальные значения гиперпараметров (число тем, alpha, beta, размерность скрытых слоёв,

коэффициент регуляризации). Система автоматически расшифровывает физический смысл каждого параметра и отображает допустимые диапазоны значений, предупреждая о потенциальных коллизиях [8].

Модуль мониторинга обучения и визуализации результатов. В процессе тренировки модели в реальном времени отображаются динамика перплексии (оценка предсказательной способности модели), когерентности (внутренняя связность тем) и KL-дивергенции (расстояние между распределениями тем). Дополнительно генерируется интерактивный граф причинно-следственных связей между выделенными темами, позволяющий отследить семантические пересечения, иерархическую подчинённость и эволюцию терминологии во времени [9].

Модуль экспертной корректировки. Ключевым отличием IDEML является возможность обратной связи без привлечения специалистов по data science. Эксперт изменяет параметры на основе визуальной оценки распределения ключевых слов, сравнивает альтернативные конфигурации в табличном формате экспериментов и инициирует перезапуск обучения с сохранением истории итераций. Система фиксирует каждое управляющее воздействие, формируя аудируемую траекторию принятия решений [10].

Методологическая новизна заключается в переходе от статической валидации к динамическому контролю качества, где каждый этап обучения сопровождается визуальной интерпретацией и возможностью корректировки. Требования к системе включают не только постфактумную интерпретацию, но и проактивное управление процессом: выбор оптимального метода, регулирование гиперпараметров, повторное формирование модели и документирование экспертных решений. Такая архитектура минимизирует зависимость от настроек по умолчанию и снижает вероятность генерации артефактных тем, возникающих из-за стохастической природы вероятностных алгоритмов [11].

В предложенной методологии базовая проблема, характерная для классических реализаций тематических моделей, – неустойчивость формирования тем при повторных запусках с одинаковыми параметрами – была решена за счёт комбинации регуляризации весовых матриц и осознанной настройки гиперпараметров. Отказ от значений «по умолчанию» в пользу экспертно-верифицированных диапазонов должен снизить дисперсию результатов. Мониторинг динамики перплексии позволил бы выявлять моменты переобучения на ранних этапах, а оптимизация по когерентности обеспечила бы семантическую связность тем без искусственного сужения лексического разнообразия [12].

Визуальная среда IDEML должна сформировать прозрачную аналитическую траекторию, в которой каждый шаг обучения будет документироваться и поддаваться верификации. При возникновении противоречивых результатов (например, расхождения между статистическими метриками и экспертной оценкой релевантности тем) система предоставляла бы детали-

зированную историю итераций, позволяя откатить изменения, скорректировать пороги фильтрации или пересмотреть архитектуру модели. Таблица экспериментов, включающая значения гиперпараметров, метрики качества, временные затраты и ссылки на визуализации, стала основой для воспроизводимости исследований и аудита качества данных [13].

Особый эффект должен был достигнут в интерпретации причинно-следственных связей между темами. Графовое представление позволило бы выявить скрытые междисциплинарные мосты (например, пересечение биомедицинских и материаловедческих кластеров в контексте нанотехнологий), а также отследить миграцию терминологии из фундаментальных исследований в прикладные патентные базы. Интерактивная настройка диапазонов параметров в режиме реального времени сократила время подбора оптимальной конфигурации модели по сравнению с ручным перебором в скриптовых средах [14].

Критерии объяснимости интерпретируемость и полнота описания могут быть удовлетворены за счёт многоуровневой визуализации: от распределения вероятностей по токенам до семантических карт доменов. Система не заменяет эксперта алгоритмическим выводом, а выступает в роли когнитивного усилителя, предлагающего гипотезы и позволяющего специалисту принимать обоснованные решения. Такой подход критически важен для стратегического управления научной деятельностью, где требуется не только классификация публикаций, но и аргументированное прогнозирование технологических трендов, оценка соответствия исследований национальным приоритетам и формирование рекомендаций по распределению ресурсов [15].

Таким образом, интеграция визуального управления в жизненный цикл тематического моделирования трансформирует «чёрный ящик» в прозрачную аналитическую систему. Результаты подтверждают, что качество машинного обучения напрямую зависит от степени вовлечённости эксперта, качества визуальной репрезентации промежуточных состояний и возможности итеративной корректировки. Предложенная методология готова к масштабированию и может быть адаптирована под различные предметные домены, обеспечивая баланс между вычислительной автоматизацией и человеческой интерпретацией.

Список литературы

1. Grootendorst M. BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure / M. Grootendorst // arXiv preprint. 2022. arXiv:2203.05794. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.05794.

2. Wu X. A survey on neural topic models: Methods, applications, and challenges / X. Wu, T. Nguyen, A.T. Luu // Artificial Intelligence Review. 2024. №57(9), 245. DOI: https://doi.org/10.1007/s10462-023-10661-7.

3. James C.K. Continual neural topic model / C.K. James, W. Mustafa // Proceedings of the 2026 Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics. 2026. – P. 6636–6650.

4. Yuan J. A survey of visual analytics techniques for machine learning / J. Yuan, C. Chen, W. Yang [et al.] // Computational Visual Media. 2021. №7(1). – P. 3–36. DOI: https://doi.org/10.1007/s41095-020-0201-3.

5. Schneider J. Explainable generative AI (GenXAI): A survey, conceptualization, and research agenda / J. Schneider // Artificial Intelligence Review. 2024. №57, 289. DOI: https://doi.org/10.1007/s10462-024-10916-x.

6. Kosasih E.E. A review of explainable artificial intelligence in supply chain management using neurosymbolic approaches / E.E. Kosasih, E. Papadakis, G. Baryannis, A. Brintrup // International Journal of Production Research. 2024. №62(5). – P. 1510–1540. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2281663.

7. Dereci U. An explainable artificial intelligence model for predictive maintenance and spare parts optimization / U. Dereci, G. Tuzkaya // Supply Chain Analytics. 2024. №8. Article 100078. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sca.2024.100078.

8. Nallakaruppan M. An explainable AI framework for credit evaluation and analysis / M. Nallakaruppan, B. Balusamy, M.L. Shri [et al.] // Applied Soft Computing. 2024. №153. Article 111307. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111307.

9. Kovari A. Explainable AI chatbots towards XAI ChatGPT: A review /A. Kovari // Heliyon. 2025. №11. e42077. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42077.

10. Wang R. Intuitively interpreting GANs latent space using semantic distribution / R. Wang, G. Wang, L. Gu [et al.] // Knowledge-Based Systems. 2025. №310. Article 112894. DOI: https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112894.

11. Pashami S. Explainable predictive maintenance / S. Pashami, S. Nowaczyk, Y. Fan [et al.] // Proceedings of the IEEE International Conference on Prognostics and Health Management. 2023. – P. 1–10.

12. Müller D. An interactive explanatory AI system for industrial quality control / D. Müller, M. März, S. Scheele, U. Schmid // Proceedings of the 27th International Conference on Intelligent User Interfaces. 2022. – P. 412–426. DOI: https://doi.org/10.1145/3490099.3511105.

13. Yang W. Survey on explainable AI: From approaches, limitations and applications aspects / W. Yang, Y. Wei, H. Wei [et al.] // Human-Centric Intelligent Systems. 2023. №3. – P. 161–188. DOI: https://doi.org/10.1007/s44230-023-00038-y.

14. Blei D.M. Latent Dirichlet Allocation / D.M. Blei, A.Y. Ng, M.I. Jordan // Journal of Machine Learning Research. 2023. №3. – P. 993–1022.

15. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead / C. Rudin // Nature Machine Intelligence. 2019. №1(5). – P. 206–215. DOI: https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x.

СЕКЦИЯ 8
ШКОЛЬНАЯ СЕКЦИЯ: ЮНЫЕ УЧЕНЫЕ

Обнизов З.С.
учащийся 10-ИТ класса
ФМШ ИСОиП (филиал) ДГТУ г. Шахты
Россия, Шахты
Obnizovzahar@gmail.com
Коваленко Д.Р.
учащийся 10-ИТ класса
ФМШ ИСОиП (филиал) ДГТУ г. Шахты
Россия, Шахты
denis.broyk@gmail.com
Дмитриенко В.А.
к.т.н., доцент кафедры «Строительство и техносферная безопасность»,
ИСОиП (филиал) ДГТУ г. Шахты
Россия, Шахты

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОПОТЕРЬ В ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЯХ

Аннотация. В статье обосновывается актуальность повышения энергоэффективности существующих зданий, поскольку на отопление в России приходится более 40% всех энергоресурсов, а около 30% теплопотерь связано с недостаточной изоляцией ограждающих конструкций. Авторы отмечают, что традиционное расположение отопительных приборов в нишах под окнами создает зоны повышенных теплопотерь из-за уменьшенной толщины стен и сопротивления подоконника конвекционным потокам. Целью работы является экспериментальное обоснование применения защитных экранов для снижения теплопередачи через наружные стены за радиаторами. Для проведения исследований разработана специализированная тепловая установка, моделирующая узел отопления, оснащенная электронным комплексом измерения температуры (датчики DS1820 и термопары ТК 1) с фиксацией в 8 точках. Подробно описан процесс тарировки оборудования, позволивший достичь точности показаний 99%. Результаты экспериментов доказали эффективность предложенного решения: установка экрана из алюбабла толщиной 4 мм снижает температуру на поверхности кирпичной стены с 29 до 21,8 °С. Внедрение таких экранов обеспечивает сокращение теплопотерь, уменьшение расхода топлива и соответствует принципам климатической нейтральности.

Ключевые слова: теплопотери, автоматизация, здания, защитный экран, экономия энергоресуров.

Obnizov Z.S.
10th-grade IT student
Institute of Service and Business (branch) Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Don State Technical University» (ISB (branch) DSTU in Shakhty town)
Russia, Shakhty
Obnizovzahar@gmail.com
Kovalenko D.R.
10th-grade IT student

Institute of Service and Business (branch) Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Don State Technical University»
(ISB (branch) DSTU in Shakhty town)
Russia, Shakhty
denis.broyk@gmail.com
Dmitrienko V.A.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Construction and Technosphere Safety,
Institute of Service and Business (branch) Federal State Budget Educational Institution
of Higher Education «Don State Technical University»
(ISB (branch) DSTU in Shakhty town)
Russia, Shakhty

AUTOMATION OF HEAT LOSS ASSESSMENT IN OPERATING BUILDINGS

Abstract. The article substantiates the relevance of increasing the energy efficiency of existing buildings, as heating accounts for more than 40% of all energy resources in Russia, and about 30% of heat loss is associated with insufficient insulation of building envelopes.The authors note that the traditional placement of heating units in niches under windows creates zones of increased heat loss due to reduced wall thickness and the windowsill's resistance to convection currents. The goal of the study is to experimentally justify the use of protective shields to reduce heat transfer through external walls behind radiators.To conduct the research, a specialized thermal unit was developed to model a heating node, equipped with an electronic temperature measurement system (DS1820 sensors and TK 1 thermocouples) recording data at 8 points. The equipment calibration process is described in detail, achieving a measurement accuracy of 99%. Experimental results proved the effectiveness of the proposed solution: installing a 4 mm thick «Alububble» shield reduces the temperature on the brick wall surface from 29°C to 21.8°C. The implementation of such shields ensures a reduction in heat loss and fuel consumption, aligning with the principles of climate neutrality.

Keywords: heat loss, automation, buildings, protective screen, energy saving.

На отопление в России тратится более 40% энергоресурсов страны.

Определено 30% удельных теплопотерь здания из-за недостаточной теплоизоляции стен, потолков подвалов, светопрозрачных ограждений. Поэтому в строительстве находят применение новые материалы и технологии, что дает толчок к развитию новых архитектурных решений.

На наш взгляд, имеется возможность повышения энергоэффективности старых зданий при минимальных затратах. Дело в том, что как правило приборы отопления устанавливаются в нишах под оконными проёмами, то есть в зонах с меньшей толщиной стен. Кроме этого, подоконник оказывает сопротивление конвективному тёплому потоку. Это значит, что в местах установки приборов отопления наблюдается зона повышенной температуры, что также приводит к росту теплопотерь.

Таким образом, разработка рекомендаций по снижению теплопотерь старых зданий весьма актуальна и будет востребована как частными домовладельцами, так и эксплуатирующими многоквартирные дома организациями.

Целью выбранной темы является обоснование применения защитных экранов в зонах установки приборов отопления. Для этого необходимо выполнить оценку снижения потерь тепла после установки экранов. Конечно, имеются аналитические методы решения таких задач, но они основаны на допущениях и не всегда имеют возможность учитывать все факторы. Поэтому решено выполнять исследования экспериментально.

Для этого разработана специальная тепловая установка (рисунок 1), моделирующая тепловой узел с прибором отопления, закреплённым на наружной стене здания. Установка содержит все элементы централизованного отопления, то есть нагреватель, циркуляционный насос и прибор отопления. С целью автоматизации и повышения точности измерений использован электронный комплекс определения температуры в 8 точках. Это значительно сократить время замеров температуры при расположении экрана между стеной и прибором отопления для снижения теплопередачи через наружную стену.

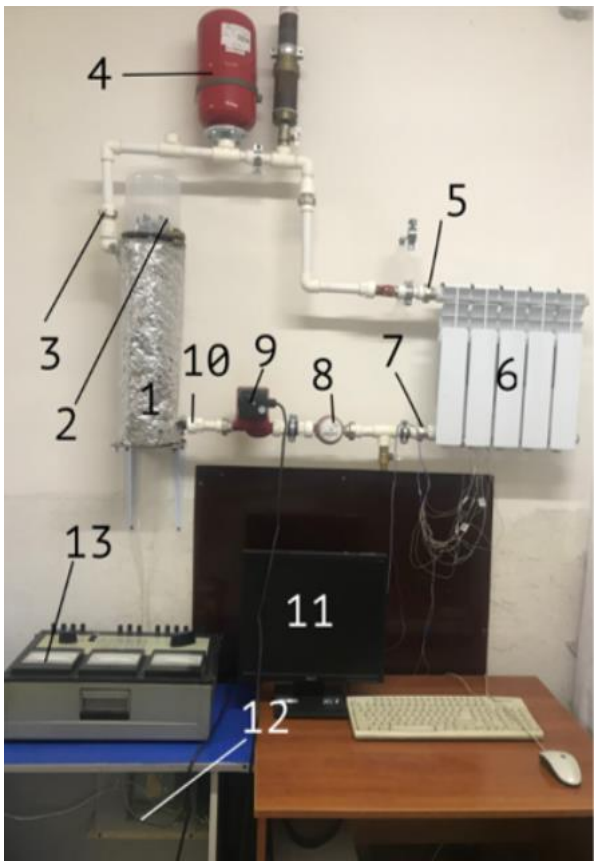


Рис. 1. Экспериментальная установка для испытания эффективности экранов: 1 – нагреватель; 2 – блок подключения; 3 – труба на выходе из нагревателя; 4 – расширительный бак; 5 – труба на входе в радиатор; 6 – радиатор; 7 – труба на выходе из радиатора; 8 – счётчик жидкости; 9 – насос; 10 – труба на входе в нагреватель; 11 – монитор; 12,13 – блок управления нагревателем

В своей работе мы использовали датчики ДС1820 и термопары ТК 1. Задачей системы с использованием в качестве датчиков температуры микросхем DS1820 является сбор информации от нескольких удаленных друг от друга термодатчиков, которые соединены между собой посредством использования шины 1-Wire. Для сопряжения персонального компьютера с сетью MicroLAN используется адаптер (DS2480B) последовательного порта (COM). Это существенный недостаток системы, поскольку современные компьютеры не имеют этого порта.

Расположение датчиков (рисунок 2) выполнено так, чтобы измерить температуру в различных точках системы и определить количество тепла на входе в радиатор и на выходе, на поверхности экрана и на поверхности стены. По полученным перепадам температур определяется величина теплопередачи различных материалов и сколько тепла уходит через стену за батареей.

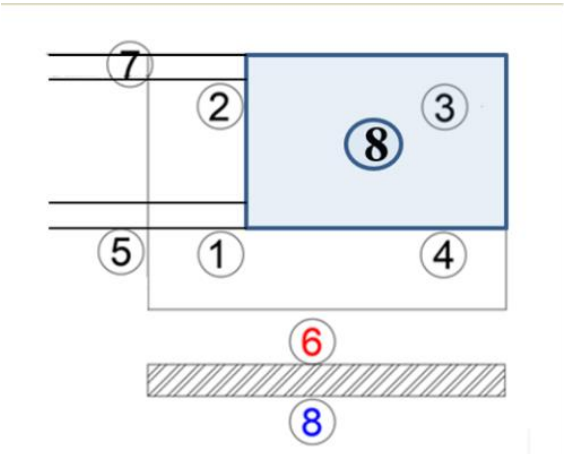


Рис. 2. Схема расположения датчиков

Тарировка производилась в несколько этапов. На нагреватель сверху мы накрыли пенопластом, для того чтобы можно было удобно разместить градусник- они выступают в роли эталона, с которым мы будем сравнивать дальнейшие показания, и для предотвращения быстрой потери тепла. В пенопласте было 3 отверстия, одно для градусника от 50 и до 100 градусов, второе для второго градусника от 0 до 50, третье для термопар и датчиков ЭДС.

После нагрева воды до 75 градусов, начали замерять каждый 1 градус показания температуры пока она падает, так как испробовав метод постоянного нагрева воды по 2 градуса начиная с 30, возникала погрешность из-за нагревателя, в котором спирали с задержкой отдавали тепло, и возникала неравномерная передача воды в нагревателе, так как приборы, находящиеся ближе к нагревательным спиралям, нагревались быстрее чем приборы вдали от них. Также возникли разности показаний среди эталонов на отметке 50 градусов. Чтобы решить эту проблемы мы использовали 2 графика разбив его на до 50 градусов и после, в программе Microsoft Office Excel, предвари-

тельно записав данные в него всех показателей, наблюдается конкретная зависимость отклонения температуры на приборах от эталонная, благодаря этому мы можем определить с вероятностью 99% точность показаний.

Результаты проведенных исследований представлены в таблице и на рисунках 3–5.

Таблица

Результаты исследований

Номер датчика	Температура воздуха, ºС	Показания комплекса, ºС	Погрешность, ºС
1	15,7	15,6	0,1
2	15,7	15,9	-0,2
3	15,7	15,9	-0,2
4	15,7	15,9	-0,2
5	15,7	16,8	-1,1
6	15,7	16,7	-1
7	15,7	16,8	-1,1
8	15,7	16,4	-0,7

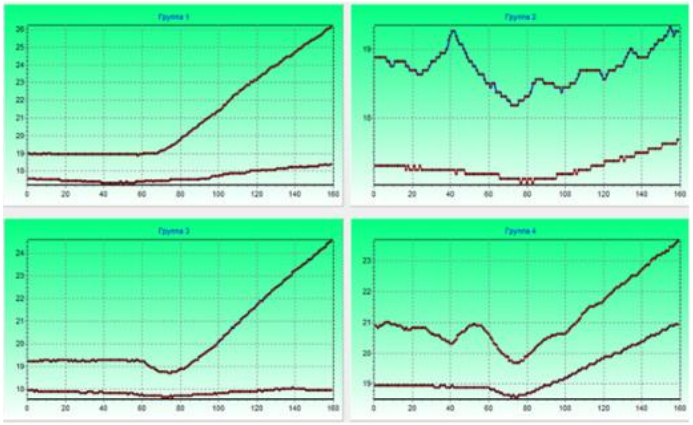


Рис. 3. Фиксация начальной температуры датчиков

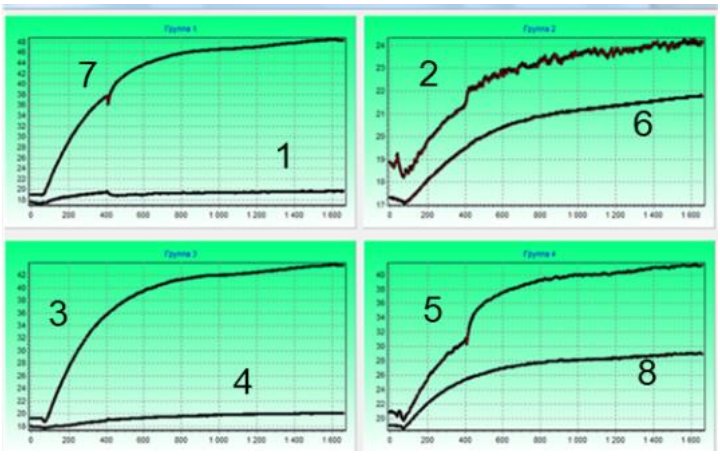


Рис. 4. Визуализация изменения температуры

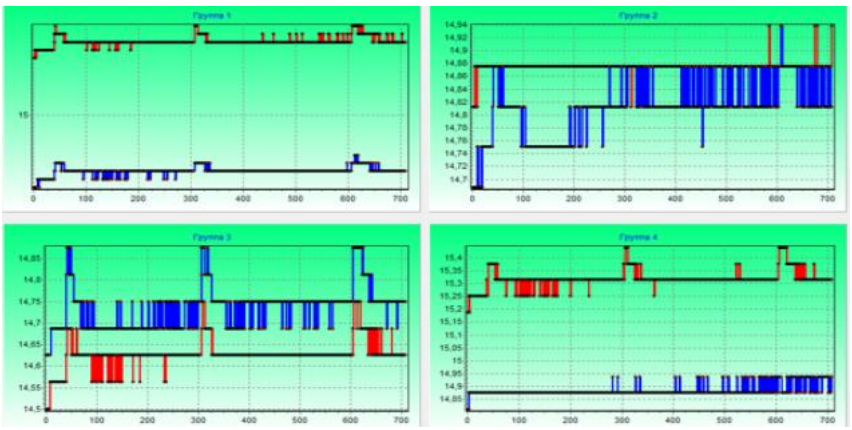


Рис. 5. Тарировка датчиков

Благодаря тарировке, и используя конкретную зависимость для каждого датчика, мы смогли продолжить исследования с помощью данных приборов.

На рисунках 6 и 7 представлены результаты снижения теплопотерь при использовании экрана и без него.

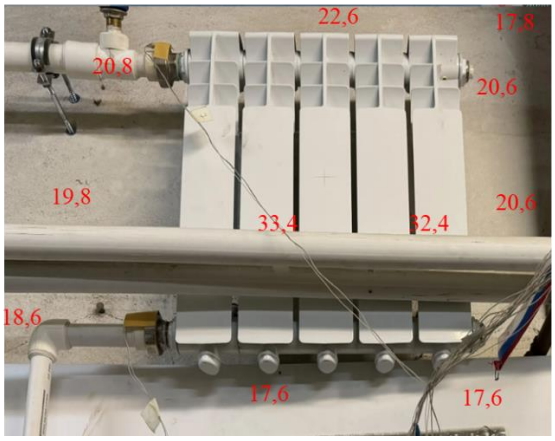


Рис. 6. Показатели теплопотерь без использования защитного экрана

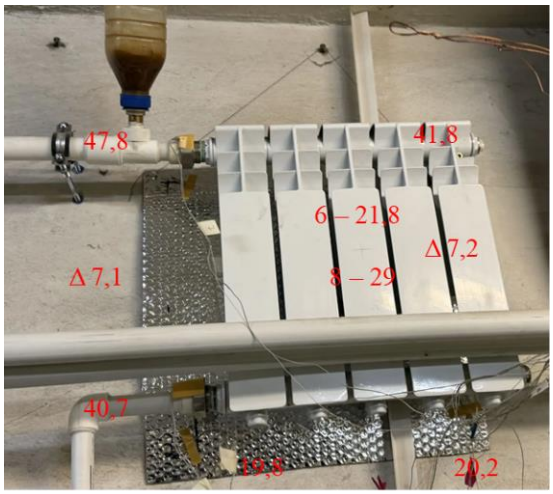


Рис. .7 Показатели теплопотерь с использованием защитного экрана

Таким образом, в ходе реализации проекта была подтверждена эффективность применения защитных экранов для минимизации теплопотерь через ограждающие конструкции в зоне установки отопительных приборов.

Экран из алюбабла толщиной 4 мм обеспечивает снижение температуры на кирпичной стене с 29 до 21,8 °С. Данное техническое решение обеспечивает снижение теплопотерь, сокращение расхода топлива и соответствует принципам климатической нейтральности.

Список литературы

1. СП 50.13330.2024 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий». – М.: Госстрой России, 2024.

2. СП 60.13330.2016 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха». – М.: Госстрой России, 2016.

3. Кокорин О.Я. Энергосберегающие технологии функционирования систем вентиляции, отопления, кондиционирования воздуха (систем ВОК). – М.: Проспект, 1999.

Ушакова А.А.
учащийся 5 класса
МБОУ «Гимназия № 41»
Россия, Кемерово
anastush@list.ru

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СБРАЖИВАНИЯ В СУБСТРАТЕ ЧАЙНОГО ГРИБА ПРИ ВВЕДЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛЕВОДОВ

Аннотация. В работе рассмотрен процесс сбраживания в чайном растворе в присутствии культуры «чайного гриба», для эффективного протекания которого традиционно добавляют бытовой сахар (сахарозу). Целью работы стало изучение протекания процессов при введении других сахароподобных веществ: различных углеводов, сахарозаменителей и подсластителей, таких как фруктоза, глюкоза, трегалоза, полидекстроза, инулин, крахмал, мальтодекстрин, сорговый, кокосовый, мед, топинамбур, лукума, якон, агава, пальмовый, тростниковый, нават, сорбит, ксилит, мальтит, а также сукралоза, стевия, аспартам. Эксперименты показали, что не все вводимые добавки одинаково влияют на развитие чайного гриба в растворе: сорбит, лукума, агава, тростниковый и пальмовый сахар, мед, нават, сахароза, фруктоза и глюкоза ускоряют развитие культуры, а стевия, аспартам, мальтит, якон, сукралоза, топинамбур и кокосовый сахар, наоборот, угнетает рост. А введение крахмала приводит к заплесневению образца. Наибольший эффект на рост «чайного гриба» оказал сахарозаменитель «сорбит», изготовленный на основе глюкозы, что подтверждает значимость глюкозы для развития «чайного гриба».

Ключевые слова: сбраживание, чайный гриб, комбуча, углеводы, сахара.

Ushakova A.A.
5th-grade student
MBOU «Gymnasium No. 41»
Russia, Kemerovo,
anastush@list.ru

STUDY OF THE FERMENTATION PROCESS IN THE SUBSTRATE OF THE TEA FUNGUS WHEN DIFFERENT CARBOHYDRATES ARE INTRODUCED

Abstract. The paper discusses the fermentation process in a tea solution in the presence of a «tea fungus» culture, which traditionally requires the addition of household sugar (sucrose) for effective fermentation. The purpose of this work was to study the processes involved in the introduction of other sugar-like substances, such as various carbohydrates, and sweeteners, such as fructose, glucose, trehalose, polydextrose, inulin, starch, maltodextrin, sorghum, coconut, honey, jerusalem artichoke, lucuma, yacon, agave, palm, cane, sorbitol, xylitol, maltitol, as well as sucralose, stevia, and aspartame. Experiments have shown that not all additives have the same effect on the development of the tea fungus in the solution: sorbitol, lukuma, agave, cane sugar, palm sugar, honey, nata, sucrose, fructose, and glucose accelerate the development of the culture, while stevia, aspartame, maltitol, yacon, sucralose, jerusalem artichoke, and coconut sugar inhibit growth. The addition of starch causes the sample to become moldy. The sorbitol sugar substitute, which is made from glucose, had the greatest effect on the growth of the «tea fungus» confirming the importance of glucose for the development of the «tea fungus».

Keywords: fermentation, tea fungus**,** kombucha, carbohydrates, sugar.

Комбуча (готовый напиток «чайного гриба») с давних времен широко используется населением в пищевых целях, а также в качестве природного профилактического и лекарственного средства. Многими людьми напиток из чайного гриба по тем или иным причинам применяется для самолечения в случаях, когда в основе патогенеза заболеваний лежит микробная причина. И хотя доказано, что напиток чайного гриба отличается богатым составом, очевидно, что изучение его свойств входит в число важных задач современной науки в силу наличия противоречивых данных о его применении и эффектах. Среди доказанных свойств чайного гриба отмечены антиоксидантные, дезинтоксикационные, противовоспалительные, иммуностимулирующие и другие [3–4].

Большим количеством авторов доказан выраженный бактериостатический и бактерицидный эффект метаболитов чайного гриба в отношении широкого спектра патогенных микроорганизмов.

В настоящее время чайный гриб, благодаря лечебным свойствам, широко используется в пищевой промышленности. Его добавляют в состав хлеба, других продуктов, готовят напитки [5].

Таким образом научные данные по культивированию чайного гриба позволят сделать производство комбучи еще более перспективным, а домашнее употребление напитка более безопасным.

Ранее проведенные исследования показали, что чайный гриб растет в питательной среде в присутствии углеводов, и именно добавление такого типа веществ (например, сахара) в субстрат играет важную роль, так как его концентрация влияет на процесс брожения [7].

Для получения раствора, в подслащённый черный чай вносят концентрат чайного гриба или закваску. При регулярном «кормлении» гриб раз-

множается образованием дочерней пленки. Раствор становится готовым, летом, через 3–4 суток, но чаще употребляют раствор 7-ми дневной выдержки. Чем дольше готовится раствор, тем больше образуется уксуса, тем кислее продукт. Чайный гриб нужно хранить в недоступном для солнечных лучей месте.

Все элементы культуры работают вместе. Вначале дрожжи расщепляют сахарозу на глюкозу и фруктозу, а также проводят гликолиз с образованием этанола. Бактерии превращают этанол в уксусную кислоту, а глюкозу в глюконовую кислоту. Кроме того, существует много других процессов, в результате которых образуются различные органические кислоты.

При получении комбучи используют любые источники сахаров, обеспечивающих протекание процесса ферментации.

Цель работы: Изучение влияния различных типов сахароподобых веществ на рост «чайного гриба».

Задачи исследования:

1) Изучить типы сахароподобых веществ: углеводы, сахарозаменители и подсластители.

2) Провести эксперименты с введением указанных веществ.

3) Определить влияние на развитие «чайного гриба».

На основании проведенного анализа состава реализуемых напитков выявлено, что в качестве подслащивающих веществ лидирующими являются сахароза (~55%). Сахароза представляет собой углевод, называемый дисахаридом. Углеводы подразделяются на моно-, ди- и полисахариды. Помимо углеводов, вместо сахара можно вносить в раствор для сбраживания сахарозаменители и подсластители.

В качестве образцов для изучения роста «чайного гриба» применяли:

- Углеводы:

- моносахариды (фруктоза, глюкоза);

- дисахраиды (сахароза, трегалоза);

- полисахариды (полидекстроза, инулин, крахмал);

- смеси сахаров (мальтодекстрин, сорговый, кокосовый, мед, топинамбур, лукума, якон, агава, пальмовый, тростниковый, нават).

- Сахарозаменители (сахароспирты): сорбит, ксилит, мальтит.

- Подсластители (не являются углеводами): сукралоза, стевия, аспартам.

Эксперимент проводили по следующим этапам:

1. Приготовление чайного раствора: в 800 мл кипятка заваривали 2 г цельных чайных листьев (черный чай «Майский») и настаивали. Через 20 минут отфильтровывали раствор от листьев и остужали до комнатной температуры (22°С).

2. Подготовка образцов: в 200 мл чайного раствора по отдельности вносили по 5 г разных сахароподобных веществ размешивая, после вносили по 20 мл закваски в каждый образец (в качестве закваски использовался суб-

страт, в котором рос концентрат «чайного гриба» в течении 15 суток). В таблице 1 приложения приведена основная информация о применяемых образцах. Таким образом, в ходе экспериментов исследовалось 24 образца с добавлением различных «сладких веществ».

3. Подготовка образца для сравнения: так как ранее проведенные эксперименты показали, что «чайный гриб» растет в чайном растворе даже без добавления сахара, то было решено за образец сравнения принять образец «без сахара». Для приготовления образца сравнения в 200 мл чайного раствора внесли 20 мл закваски.

4. Культивирование чайного гриба: в течение 21 суток следили за внешними изменениями в образцах и замеряли pH субстрата. В конце эксперимента, образовавшиеся дочерние пленки «чайного гриба» взвешивали.

Результаты эксперимента

При приготовлении образцов все сахароподобные вещества полностью растворялись в чайных растворах и только крахмал осел на дно, так как является нерастворимым в водных растворах.

На всех образцах субстратов на 5 сутки образовалась на поверхности дочерняя пленка, которая в дальнейшем утолщалась. Однако на 7 сутки на образце с крахмалом образовалась плесень (рис. 1), в результате раствор утилизировали.



Рис. 1. Образование плесени на образце с крахмалом

Изменение pH субстратов приведено на рисунке 2. Стоит отметить, что линии значений pH большинства образцов после 5 суток находится ниже линии pH образца «без сахара» и только у 6 образцов находятся выше: смеси сахаров (кокосовый, якон, топинамбур), сахарозаменитель (мальтит) и подсластители (сукралоза и аспартам). Интересно, что именно в этих образцах «чайный гриб» развивался хуже, чем в образце для сравнения без сахара (рис. 3).

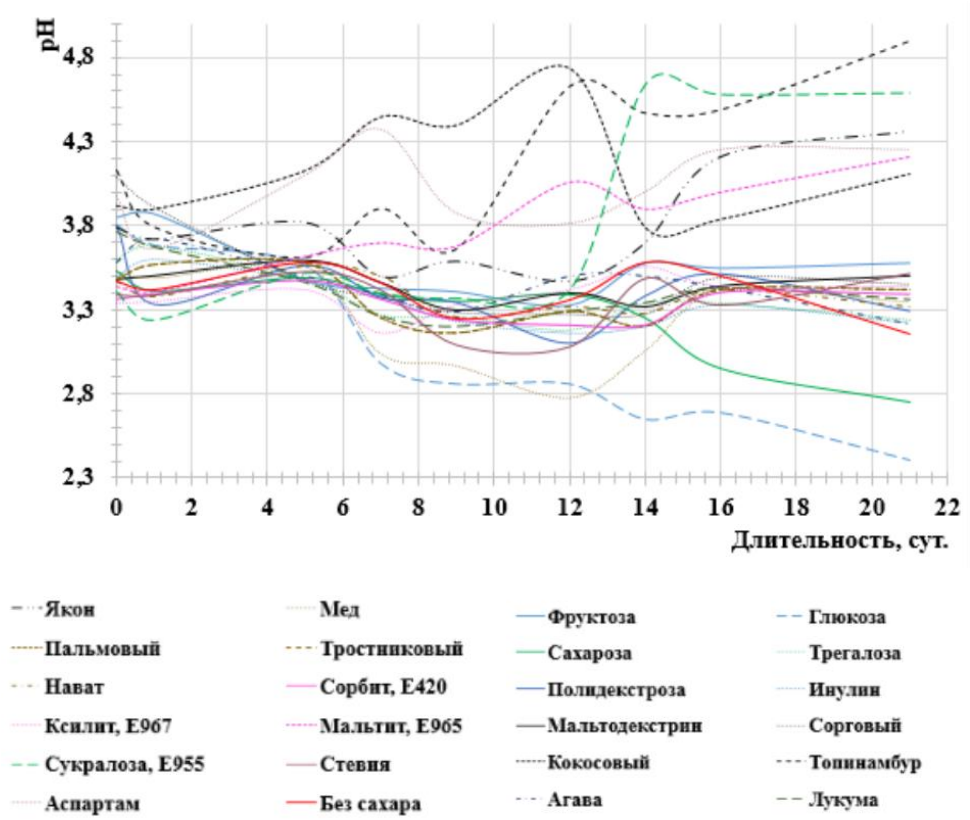


Рис. 2. График изменения pH субстрата во время сбраживания

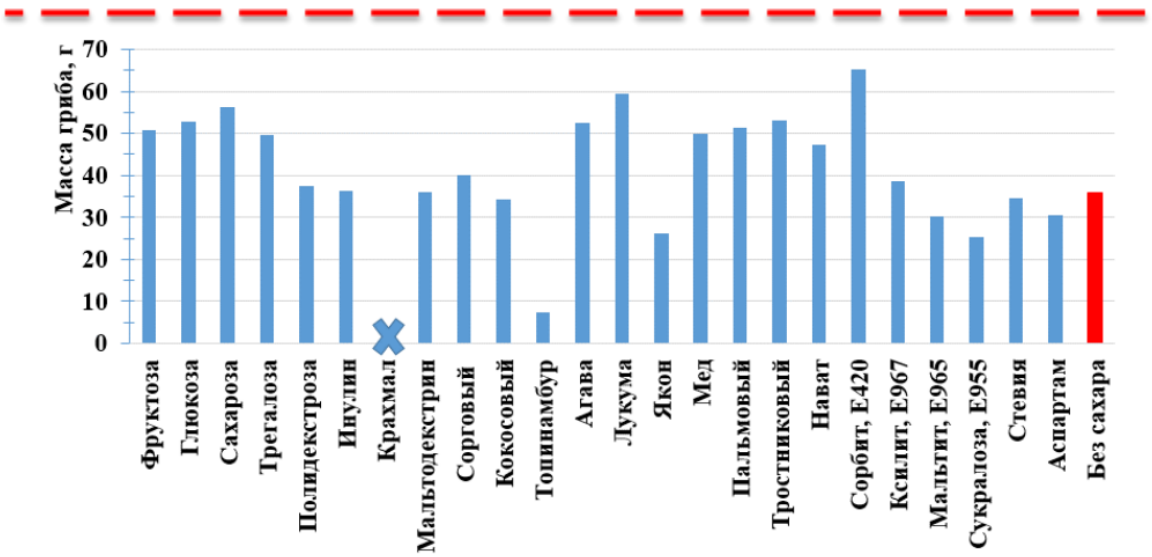


Рис. 3. Значение массы дочерней пленки на 21 день сбраживания

Если сравнить массы дочерних пленок образцов с образцом сравнения (рис. 3), то видно, что 16 образцов хотя бы незначительно ускоряют рост «чайного гриба», а 7 из них угнетают рост. На рисунке 4 приложения образцы отображены в порядке уменьшения эффективности, а на рис. 5 приведены вещества, неблагоприятно влияющие на процесс сбраживания.

Сорбит, Е420	81,8
Лукума	65,8
Сахароза	56,9
Тростниковый	47,6
Глюкоза	47,2
Агава	46,5
Пальмовый	42,9
Фруктоза	41,5
Мед	38,8
Трегалоза	38,3
Нават	31,6
Сорговый	11,8
Ксилит, Е967	7,5
Полидекстроза	4,2
Инулин	1,4
Мальтодекстрин	0,7



Рис. 4. Образцы веществ, ускоряющих сбраживание и% увеличения эффективности по сравнению с образцом «без сахара»

Стевия	-3,5
Кокосовый	-4,4
Аспартам	-15,0
Мальтит, Е965	-15,7
Якон	-26,7
Сукралоза, Е955	-29,1
Топинамбур	-79,6
Крахмал	-100,0

Рис. 5. Образцы веществ, замедляющих сбраживание и% уменьшения развития «чайного гриба» по сравнению с образцом «без сахара»

Таким образом наибольший рост наблюдается при введении сахарозаменителя Сорбита. При работе дрожжевых грибков глюкоза переходит в спирт, в случае с Сорбитом он уже является спиртом, а значит в основном процесс сбраживания проходит за счет уксуснокислых бактерий. А из литературных источников известно, что как раз кислотообразующие бактерии легко перерабатывают Сорбит – отсюда значительный рост гриба.

Лукума, агава, тростниковый и пальмовый сахар, мед, нават являются смесью сахаров, которые содержат в разных пропорциях сахарозу, фруктозу и глюкозу, поэтому так же, как и сахароза, глюкоза и фруктоза улучшают рост гриба.

Стоит отметить, что сахароза сильнее ускоряет рост чайного гриба в ряду моно- и дисахаридов (56,9%), чуть меньше глюкоза (47,2%) и фруктоза (56,9%), а замыкает трегалоза (38,3%). Разница в увеличении роста небольшая и связана, с тем, что сахароза источник образования в субстрате глюкозы и фруктозы (поэтому первая в указанном ряду). Глюкоза способствует

росту уксуснокислых бактерий, в отличие от фруктозы, которая, согласно литературным данным, не подвергается дальнейшему разложению. Трегалоза, состоящая из двух остатков глюкозы, требует большее время для разложения, поэтому замыкает ряд.

Полидекстроза и инулин являются полисахаридами, а смесь сахаров мальтодекстрин в своем составе содержит большое количество полисахаридов, которые не поддаются сбраживанию, но при этом не угнетают рост «чайного гриба».

Наименее неблагоприятно культивирование чайного гриба при добавлении крахмала, возможно в связи с тем, что он не растворим в воде комнатной температуры, а значит не участвует в ходе процесса сбраживания, при этом возможно протекание побочных реакций, которые вовсе угнетают культуру.

Стевия, аспартам и сукралоза – сложные органические вещества и не являются вовсе углеводами, поэтому сложно предугадать, какие химические реакции протекали в процессе сбраживания, но они явно неблагоприятно воздействовали на культуру гриба.

Остается также не понятным, почему кокосовый, якон и топинамбур угнетают рос чайного гриба, возможно из-за наличия в них каких-то других веществ.

Таким образом, подтверждено влияние вида «сладкого вещества» на процесс сбраживания и рост «чайного гриба», при этом:

- *чистые моно-, ди- и полисахариды увеличивают активность,* особенно сахароза (на 56,9%) и глюкоза (47,2%), а значит вероятнее всего именно глюкоза имеет важнейшее значение при сбраживании;

- *наибольший эффект на рост «чайного гриба» оказал сахарозаменитель «сорбит»,* изготовленный на основе глюкозы, что еще раз подтверждает значимость глюкозы для развития «чайного гриба»;

- *все рассмотренные подсластители, не только не увеличивают, а видимо снижают активность «чайного гриба» (от 4 до 35%)* вероятно в связи с тем, что не являются углеводами и даже в организме человека не поддаются расщеплению**;**

- *некоторые природные смеси сахаров (кокосовый, якон, топинамбур) угнетают деятельность культуры «чайного гриба»,* хотя и состоят из моно- и дисахаридов, поэтому необходимы дополнительные исследования. Возможно, в их составе присутствуют другие вещества, которые могут угнетать культуру «чайного гриба».

Список литературы

1. Воробьева, В.М. Технологические особенности производства фермен-тированных напитков с использованием чайного гриба / В.М. Воробьева [и др.] // Вопросы питания. – 2022. – V. 91. – № 4. – С. 115–120.

2. ГОСТ 6687.5-1986. Продукция безалкогольной промышленности. Методы определения органолептических показателей и объема продукции: дата введения 30.06.1987. – Москва: Издательство стандартов, 1994. – 8 с.

3. Адиатуллина, И.Н. Чайный гриб. / И.Н. Адиатуллина, Л.В. Волкова // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2023. – №2.

4. Алиева, Е.В. Антибактериальный потенциал и перспективы использования чайного гриба / Е.В. Алиева, К.М. Болтачева, Л.Д. Тимченко // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2018. – №4.

5. Фролова, Ю.В. Российский рынок ферментированных напитков на основе чайного гриба. // Вопросы питания. – 2022. – №3 (541). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rossiyskiy-rynok-fermentirovannyh-napitkov-na-osnove-chaynogo-griba.

6. Ушакова, А.А. Методы анализа качества комбучи, полученной в домашних условиях. / А.А. Ушакова, Е.Е. Салтымакова, А.Г. Ушаков // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: Материалы VI Всероссийской конференции, Кемерово, 29–30 ноября 2022 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 702.1–702.5.

7. Ушакова А.А. Влияние вида исходного раствора на рост «чайного гриба». // Сборник тезисов докладов «Проблемы и перспективы современного общества»: Материалы VIII Международной научно-практической конференции с международным участием обучающихся и педагогов. – Новокузнецк: ГПОУ КузТСиД, 2023. – С. 2561–566.

8. Ушакова, А.А. Изучение влияния концентрации исходных растворов на рост «чайного гриба». / А.А. Ушакова, Е.Е. Салтымакова, Е.С. Ушакова // Региональная научно-практическая конференция студентов и школьников «Экология и безопасность жизнедеятельности-2022». – 49.1–49.4.

9. Ушакова, А.А. Изучение влияния вида чая на рост «чайного гриба». / А.А. Ушакова, Е.П. Лоскутова // Сборник статей XVI Международной научной конференции «Инновации в технологиях и образовании». – Белово, 2023. – С. 66–68.

10. Ушакова А.А. Изменение свойств молочных продуктов при введении закваски чайного гриба. / А.А. Ушакова, А.Е. Шурдова // Материалы VII Международного молодежного экологического Форума 28–29 ноября 2023 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева». – Кемерово, 2024. – С. 0214.1–4. https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Forum/Ecology/2023/MEF_2023/pages/title-1.htm.

11. Ушакова, А.А. Влияние закваски на рост «чайного гриба» в растворах. / А.А. Ушакова, А.Е. Шурдова // Сборник Всероссийской научно-практической конференции «Экология и безопасность жизнедеятельности», 2023. – 323.1. – 4 с.

Овчинников В. В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru
Чуликова Ж.Е.
заведующий кафедрой техники и технологии промышленного
и гражданстkого строительства
Коломенский институт (филиал) Московский политехнический университет
Россия, Коломна
matriza_Janna@mail.ru
Хардина В.М.
учащийся 10 класса
МБОУ СОШ №16
Россия, Коломна
haikujj39@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ СВАРКЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Аннотация. Аустенитная сталь – высоколегированный сплав, обладающий уникальным комплексом свойств: высокой коррозионной стойкостью, отличной пластичностью, жаропрочностью и немагнитностью. Основной целью данного исследования является изучение фазово-структурных изменений аустенитной стали и её поведения при сварке для создания надежных конструкций. Сварка аустенитных сталей сопряжена с рядом трудностей, главная из которых – образование вторичных фаз, в частности феррита. Феррит, появляющийся в зоне сварного шва, придаёт стали магнитные свойства и ухудшает её коррозионную стойкость. Для получения чисто аустенитной структуры и исключения присутствия феррита требуется системный подход, включающий оптимальный подбор состава сплава, строгие режимы термической обработки и контроль микроструктуры. В ходе работы были изучены комплексные свойства аустенитной стали и разработана методика подавления ферритной фазы, позволяющая создавать надёжные нефтепроводы.

Ключевые слова: аустенитная сталь; сварное соединение; межкристаллитная коррозия, никель; термическая обработка.

Ovchinnikov V.V.
Doctor of technical sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru
Chulikova Zh.E.
Head of the Department of Engineering and Technology
of Industrial and Civil Engineering
Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University
Russia, Kolomna
matriza_Janna@mail.ru
Khardina V.M.
10th grade student
Municipal Budgetary Educational Institution Secondary School No.16
Russia, Kolomna
haikujj39@gmail.com

IMPROVING THE QUALITY OF OIL PIPELINES DURING WELDING OF AUSTENITIC STEELS

Abstract. Austenitic steel is a high–alloy alloy with a unique set of properties: high corrosion resistance, excellent ductility, heat resistance and non-magnetism. The main purpose of this study is to study the phase-structural changes of austenitic steel and its behavior during welding to create reliable structures. Welding of austenitic steels is fraught with a number of difficulties, the main of which is the formation of secondary phases, in particular ferrite. Ferrite, which appears in the weld area, gives the steel magnetic properties and worsens its corrosion resistance. To obtain a purely austenitic structure and eliminate the presence of ferrite, a systematic approach is required, including optimal selection of the alloy composition, strict heat treatment regimes, and microstructure control. In the course of the work, the complex properties of austenitic steel were studied and a method for suppressing the ferritic phase was developed, which makes it possible to create reliable oil pipelines.

Keywords: austenitic steel; welded joint; intercrystalline corrosion, nickel; heat treatment.

Основной целью исследования является изучение фазово-структурных изменений аустенитной стали и её поведения при сварке для создания прочных и надёжных сварных конструкций. Как известно, в сварных соединениях нефтеоборудования присутствие феррита не допускается из-за его магнитности, что ухудшает эксплуатационные характеристики. Однако в процессе сварки аустенита возможно образование феррита.

В ходе работы была разработана методика устранения вторичных фаз аустенита. Для достижения целей было необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучение критериев, по которым сталь может считаться подходящей для использований в нефтеперерабатывающей промышленности;
2. Анализ комплексный свойств аустенитной стали;
3. Анализ технологии сварки астенита;
4. Исследование физико-механических свойств аустенитной стали;
5. Составление методики обработки аустенитной стали.

Легированные стали, традиционно используемые для изготовления оборудования нефтеперерабатывающей промышленности, обладают высокой прочностью, но часто недостаточной коррозионной стойкостью и вязкостью. Их главная проблема – склонность к хрупкому разрушению и коррозионному растрескиванию под напряжением при воздействии агрессивных сред и динамических нагрузок, что приводит к образованию трещин и преждевременному выходу из строя. В этом случае аустенитные стали представляют собой актуальную альтернативу. Их преимущество – способность к вязкому деформированию и фазовому переходу под нагрузкой, что позволяет эффективно поглощать энергию удара и предотвращать разрушение оборудования.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики по созданию материалов с качественно новым уровнем эксплуатационной надёжности.

Предложенная методика позволит получить сварное соединение с чисто аустенитной структурой, не содержащей феррита, что обеспечивает требуемую немагнитность, коррозионную стойкость и надёжность нефтеоборудования в условиях длительной эксплуатации.

Первая часть работы будет проходить в формате изучения и анализа теоретического аспекта, необходимого для подготовки к проведению эксперимента и последующему составлению методики.

В исследовательской части будут использоваться различные источники информации – открытые интернет-ресурсы, научные статьи, а также специализированная техническая литература.

Вторая часть работы – практика. Будет составлена методика обработки стали на основе данных, полученных во время исследования, и результатов анализа характеристик аустенитной стали с помощью лабораторного оборудования ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» [1, 3, 4].

1. Изучение критериев, по которым сталь может считаться подходящей для изготовления нефтеперерабатывающего оборудования

Металл – это самый частый выбор для создания инженерных конструкций. Его выбирают за счет прочности, надежности и отработанных технологий производства.

Выбор металла для нефтеперерабатывающего оборудования базируется на балансе между коррозионной стойкостью (для работы в агрессивных средах, содержащих сероводород, хлориды и органические кислоты), жаропрочностью (чтобы избежать потери прочности при высоких температурах), свариваемостью и стоимостью. Ключевыми критериями являются стойкость к сероводородному коррозионному растрескиванию, предел текучести (обычно >250–350 МПа для конструкционных сталей, для аустенитных – ниже, но за счёт пластичности) и способность выдерживать длительные циклические нагрузки (термоусталость, вибрации, перепады давления).

Обычно о коррозионной стойкости как характеристике металлических материалов говорят, когда речь заходит о выборе стали для работы в агрессивных средах, эффективности легирования (хромом, никелем, молибденом), устойчивости к межкристаллитной коррозии и контроле качества термической обработки. При сравнении некоторых металлов, для выявления характеристик которых требуется различное дорогостоящее оборудование, единственный показатель, характеризующий способность сопротивляться химическому разрушению в среде сероводорода, хлоридов или органических кислот – это коррозионная стойкость.

Стойкость материала к хрупкому разрушению зависит от скорости нагружения, температуры, формы и размеров элемента конструкции. Сопротивление коррозионному растрескиванию резко снижается при высоких статических или циклических нагрузках, при температурах, близких к комнатной или ниже, а также при наличии концентраторов напряжений (сварные швы, риски, изменения сечения), способствующих зарождению трещин.

Металлоёмкость и стоимость оборудования напрямую зависят от толщины стенки, площади поверхности и плотности используемого материала, а также от необходимости применения дорогостоящих легирующих добавок.

Реакторы гидрокрекинга, каталитического риформинга, ректификационные колонны и теплообменники являются важнейшими компонентами нефтеперерабатывающих заводов, используемыми для переработки сырой нефти в товарные продукты в условиях высоких температур, давлений и агрессивных сред. Эти аппараты предназначены для обеспечения различного уровня коррозионной стойкости и жаропрочности в зависимости от конкретной технологической среды. Выбор материала зависит от состава перерабатываемого сырья, температуры, давления и требуемого ресурса работы [1].

2. Анализ комплексный свойств аустенитной стали

Аустенитная сталь – это высоколегированный сплав (обычно 12–18% Cr, 8–30% Ni), обладающий уникальным комплексом свойств: высокой коррозионной стойкостью, отличной пластичностью, жаропрочностью, немагнитностью и способностью к закалке.

К комплексным свойствам аустенитной стали относятся:

Коррозионная стойкость: содержание хрома обеспечивает образование защитной оксидной пленки, делая сталь устойчивой к ржавчине, воде, кислотам, щелочам и атмосферным воздействиям.

Высокая пластичность и деформируемость: благодаря гранецентрированной кубической (ГЦК) решетке, сталь отлично штампуется, деформируется, хорошо сваривается и обрабатывается в холодном и горячем состоянии.

Температурная стабильность: аустенитные стали являются жаропрочными и жаростойкими, сохраняя прочность при значительном нагреве. Аустенитная структура стали имеет высокую температуру рекристаллизации. Легирующие элементы, затрудняющие диффузию и рекристаллизацию, повышают ее жаропрочность. Жаропрочность этой стали в первую очередь зависит от высокого содержания хрома.

Низкая магнитная восприимчивость: в нормальном состоянии аустенитные стали немагнитны, что важно для приборостроения и электротехники [5].

Однако, при обработке аустенитная сталь может выделять феррит. Феррит – это фазовая составляющая сталей и чугунов, представляющая собой твердый раствор углерода (до 0,02%) и легирующих элементов в α-железе с объёмноцентрированной кубической (ОЦК) решеткой. Это мягкая, пластичная и сильно магнитная фаза.

Немагнитность сталей для сварных соединений оборудования нефтепереработки считается желательной или обязательной по ряду причин, связанных с эксплуатационными и технологическими требованиями:

Намагничивание и загрязнение оборудования – магнитные свойства способствуют притягиванию и удержанию ферромагнитных частиц (окалина, продукты коррозии, частицы катализатора) на внутренних стенках аппаратов и трубопроводов. Это вызывает абразивный износ, затрудняет очистку, провоцирует локальную коррозию и снижает эффективность теплообмена.

Ограничение коррозионной стойкости и технологичности – наличие ферритной (магнитной) фазы в сварных швах аустенитных сталей ухудшает сопротивление межкристаллитной коррозии и сероводородному растрескиванию. Кроме того, магнитные поля, возникающие при сварке (эффект «магнитного дутья»), затрудняют формирование качественного шва, что особенно критично для оборудования, работающего под давлением и в агрессивных средах.

3. Анализ технологии сварки

Сварка аустенитных сталей сопряжена рядом трудностей. Эти стали обладают многокомпонентностью легирования и разнообразием условий эксплуатации сварных конструкций. Главной и общей особенностью сварки является склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин, имеющих межкристаллитный характер коррозии.

Металлу сварных швов свойственны ячеисто-дендритные формы кристаллизации, что приводит к образованию крупных столбчатых кристаллов и обогащению междендритных участков примесями, образующими легкоплавкие фазы. Применение методов, способствующих измельчению кристаллов и устранению столбчатой структуры, повышает стойкость швов против образования горячих трещин.

Введение в сталь никеля от 9–11% придает ей особые тепловые свойства, с добавлением никеля уменьшается коэффициент теплового расширения Ме. Никель, как элемент стабилизирующий γ–фазу, увеличивает область стабильности аустенита. Аустенитные хромоникелевые стали обладают рядом ценных физико-механических свойств, обусловленных их структурой и составов. Так они сочетают достаточную прочность с очень высокой пластичность и вязкостью в широком интервале температур, не упрочняются при закалке, хорошо свариваются, теплостойки, жаропрочны, маломагнитны или немагнитны. [2]

Важно помнить: нарушение технологии может привести к потере коррозионной стойкости, появлению трещин и снижению прочности сварных соединений. Для каждой марки стали и условий эксплуатации подбираются свои сварочные материалы и режимы.

4. Исследование физико-механических свойств аустенитной стали

В работах [1, 3, 4] были получены данные о механических свойствах исследуемой стали марки 08Х18Н10Т (Таблица).

Таблица

Физико-механические свойства аустенитной стали 08Х18Н10Т в состоянии поставки и после аустенизации, влияние нагревов на структуру стали

Состояние	Температура испытаний, °С	Время $\tau_{ст}$, тыс. ч.	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	Структура
Исходное (И)	20	-	663	338	51	75	Мелкозернистый аустенит, немного карбидов TiC по телу зерна
	450	5	420	274	29	59	Крупные и мелкие карбиды Me_7C_3 + TiC
	550	2	400	253	32	61	Карбиды $Me_{23}C_6$ + TiC крупные, по границам зерен
	650	5	337	245	25	66	Карбиды $Me_{23}C_6$ + TiC по границам зерен. Крупная σ-фаза
После аустенизации (А)	20	-	620	274	48	75	Мелкозернистый аустенит, дисперсия карбидов TiC по всей структуре
	450	5	375	182	29	68	Крупные и мелкие карбиды Me_7C_3 + TiC
	550	2	354	152	28	69	Крупные и мелкие карбиды Me_7C_3 + TiC
	650	5	311	143	25	66	Карбиды $Me_{23}C_6$ + TiC крупные, по границам зерен

Как видно, после нагрева термообработанная сталь 08Х18Н10Т имеет пониженные механические свойства, особенно пластичность и вязкость, то есть склонна к хрупкому разрушению. Однако технологические свойства лучше и «мягкий» металл легче обработать. При нагреве до температуры 450–600°С происходит выделение карбидов преимущественно по границам зерен аустенита. Следствием такого процесса является развитие у стали склонности к МКК. В случаях, когда в процессе эксплуатации змеевики долго пребывают в температурном интервале 600–750°С, выделяется σ-фаза, которая сопровождается сильным охрупчиванием металла и появлением трещин при охлаждении аппаратуры с рабочих температур в период остановок оборудования.

Применение для сварки труб из стали 08Х18Н10Т высокохромистого сварочного материала, формирующего аустенитно-ферритную структуру с высоким содержанием феррита в металле сварного шва, не стабилизированную ниобием, привело к развитию 475-градусной хрупкости, т.е. к внутрифазовому перераспределению хрома в феррите, выделению и растворению карбидов хрома в α-фазе при температуре эксплуатации, недостаточной для выделения σ-фазы (350…550 °С).

Так же было изучено влияние термообработки на фазово-структурные изменения материала после сварки (Рис.) [6]. Изучив информацию, представленную на диаграмме, был сделан вывод, что при быстром охлаждении аустенитной стали после сварки, сталь пропускает зону феррита. Подобная

термообработка позволяет уменьшить магнитность стали. При более медленном охлаждении сталь попадает в зону феррита.

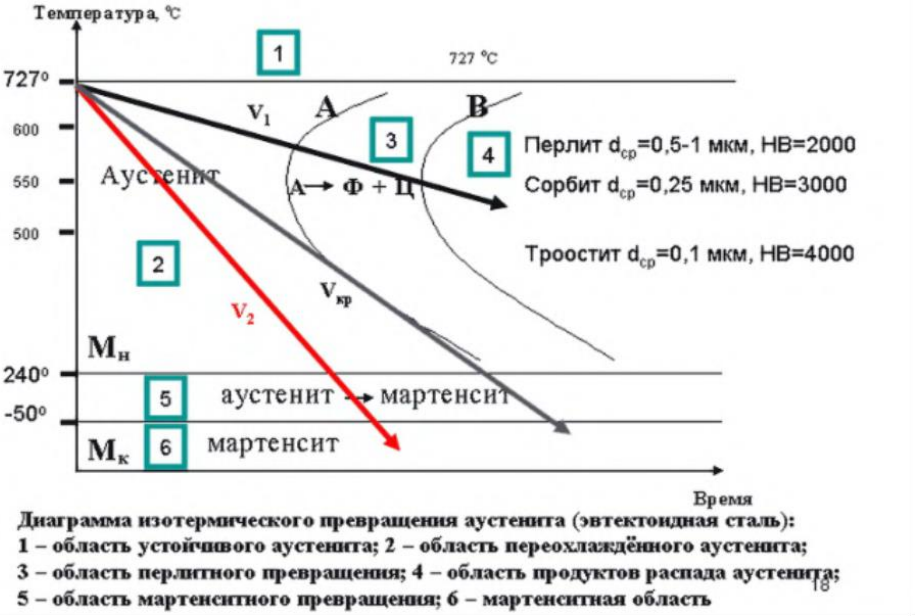


Рис. Диаграмма превращения аустенита при охлаждении

На основе теоретических и экспериментальных данных была составлена методика создания надежных сварных соединений из такой стали.

5. Разработка методики создания надежных трубопроводов из аустенитной стали

Методика создания качественных сварных соединений из аустенитной стали будет состоять из трёх пунктов. Каждый из них выведен на основе полученной ранее информации.

1. Для сварки нужно использовать марки электродов с высоким содержанием никеля. Это обеспечивает не только хорошую коррозионную стойкость, но и высокую пластичность шва. Примеры марок:

ОЗЛ-8 – эти электроды также подходят для сварки стали 08Х18Н10Т и обеспечивают хорошую пластичность и коррозионную стойкость.

ESAB OK 61.30 – электроды этой марки известны своим высоким качеством и предназначены для сварки аустенитных сталей. Они обеспечивают отличную устойчивость к межкристаллитной коррозии и хорошую прочность шва.

ESAB E309L-16 – этот электрод имеет повышенное содержание никеля и хрома, что делает его подходящим для сварки нержавеющих сталей, включая 08Х18Н10Т, особенно в случаях, когда требуется соединение с углеродистыми и низколегированными сталями.

При выборе электрода важно учитывать условия, в которых будет эксплуатироваться сварное соединение (температура, агрессивные среды и т.д.).

Перед сваркой обязательно проведение подготовки поверхности, чтобы удалить загрязнения и окислы, что поможет избежать дефектов в шве.

2. Обязательная термическая обработка изделий после сварки. Если охлаждение аустенитной стали будет происходить с достаточной скоростью, удастся снизить её магнитность, избежав зоны феррита. Возможно использование отжига для предотвращения обратного выделения феррита. Не стоит допускать длительных выдержек или медленного охлаждения в диапазоне 600–900 °С, чтобы исключить образование феррита по диффузионному механизму.

3. Контроль и диагностика материала. В [1, 3, 4] указано, что исходя из предшествующей длительности и температурного режима эксплуатации целесообразно в период очередных капитальных ремонтов произвести углубленное исследования состояния металле и его «паспортизации» на момент контроля. Проверку можно осуществлять с помощью оптической и электронной микроскопии. Использование магнитных измерений и рентгеноструктурного анализа для количественной оценки содержания феррита так же может быть эффективно. Если при диагностике будет обнаружен феррит, сегмент следует заменить для сохранения немагнитности конструкции.

В ходе работы были изучены комплексные свойства аустенитной стали. На основе полученной информации составлена методика обработки материала для создания качественных сварных соединений, которая может быть использована при производстве нефтеперерабатывающего оборудования.

Для получения чисто аустенитной структуры и исключения присутствия феррита в таких сплавах требуется системный подход, включающий подбор состава, режимы термической обработки и контроль микроструктуры.

Для полного устранения феррита в аустенитной стали необходимо комплексное управление химическим составом, режимами нагрева и охлаждения, а также деформационной обработкой. Только сочетание этих мер гарантирует получение чисто аустенитной структуры с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Методика может быть доработана, она имеет перспективы дальнейшего улучшения. Могут быть созданы более подходящие марки электродов для сварки, или разработаны алгоритмы автоматизации проверки стали после обработк

Список литературы

1. Пути повышения срока эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников, О. В. Киселева [и др.]. Москва: Вестник машиностроения: Инновационное машиностроение, 2026. № 1. – С. 76–81.

2. Сварка аустенитных сталей: ключевые аспекты / Целихов Н.С., Чуликова Ж.Е., Овчинников В.В. Москва: Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета, 2025. – С. 216–222.

3. Чуликова, Ж. Е. Влияние длительных выдержек при повышенной температуре на жаропрочность стали 08Х18Н10Т / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. № 5. – С. 221–228.

4. Чуликова, Ж. Е. Влияние холодной деформации на физико-механические свойства стали 08Х18Н10Т при кратковременном нагружении / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. № 3. – С. 138–142.
5. Свойства аустенитных сталей и где их используют. URL: https://fushunspecialsteel.ru/news/232 (дата обращения 05.04.2026).
6. В.Н. Коробко, М.М. Сычев, Г.Е. Горянина Иллюстративный материал для лекций по курсу «Материаловедение». URL: https://studfile.net/preview/6145328/page:3/ (дата обращения 05.04.2026).

Фотинов Р.В.
учащийся 6 «Г» класса
ГБОУ Школа № 1534 «Академическая»
Россия, Москва
roman.fotinov@yandex.ru
Лазакович Т.В.
педагог – руководитель проекта
ГБОУ Школа № 1534 «Академическая»
Россия, Москва
alazakovich@yandex.ru
Суровцева Е.В.
методист – руководитель проекта
Школа математики и программирования «Алгоритмика»
Россия, Москва
Surovtseva_elena@inbox.ru

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ИГРЫ В СРЕДЕ SCRATCH ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАВЫКОВ РЕШЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ У МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

Аннотация. В работе описывается процесс создания интерактивной обучающей игры в среде программирования Scratch. Игра предназначена для учеников начальной школы и помогает осваивать решение логических задач на сложение и вычитание.

Тема актуальна, потому что, несмотря на большое количество современных обучающих программ, среди них мало таких, которые предлагают систему задач, постепенно развивающую математическое мышление у детей 7–9 лет. При этом игровой формат повышает интерес детей к учёбе и помогает лучше усваивать материал.

В работе объясняется, почему игровой формат хорошо применять в обучении, описывается, как разрабатывался сюжет игры и программировалась её логика в Scratch. Сюжет построен вокруг поездки гномов в автобусе: ученик управляет посадкой и высадкой персонажей на остановках и в конце отвечает на вопрос о количестве оставшихся пассажиров. Для создания персонажей и фонов использовался графический редактор Krita.

Игру протестировали 60 учеников второго класса онлайн-школы «Алгоритмика». По итогам опроса 86,7% ребят отметили, что играть было интересно и что игра помогла понять, как решать задачи такого типа.

Сделан вывод о том, что подобные программы полезно применять на занятиях по математике и программированию. В настоящее время игра используется в школе «Алгоритмика» на занятиях с детьми 8–9 лет.

Ключевые слова: Scratch, обучающая игра, логические задачи, начальная школа, цифровые образовательные технологии, вычислительное мышление, блочное программирование, интерактивное обучение, геймификация, Krita.

Fotinov R.V.
6th-grade student (Class 6 «G»)
School No. 1534 «Akademicheskaya»
Russia, Moscow
roman.fotinov@yandex.ru
Lazakovich T.V.
Teacher / Project Supervisor
School No. 1534 «Akademicheskaya»
Russia, Moscow
alazakovich@yandex.ru
Surovtseva E.V.
Methodologist / Project Supervisor
«Algorithmika» School of Mathematics and Programming
Russia, Moscow
Surovtseva_elena@inbox.ru

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE EDUCATIONAL GAME IN SCRATCH TO FOSTER LOGICAL PROBLEM-SOLVING SKILLS IN PRIMARY SCHOOL STUDENTS

Abstract. This paper describes the process of creating an interactive educational game using the Scratch programming environment. The game is designed for primary school students and helps them master the solution of logic problems involving addition and subtraction.

The topic is relevant because, despite the abundance of modern educational software, few programs offer a system of problems that progressively develops the mathematical thinking of children aged 7–9. Moreover, the game format boosts children's interest in learning and facilitates better comprehension of the material.

The paper explains the benefits of using a game-based format in education and describes the development of the game's storyline and the programming of its logic in Scratch. The plot centers on a bus ride taken by gnomes: the student manages the boarding and alighting of characters at stops and, at the end, answers a question about the number of remaining passengers. The Krita graphics editor was used to create the characters and backgrounds.

The game was tested by 60 second-grade students from the Algoritmika online school. A survey revealed that 86.7% of the students found the game engaging and felt it helped them understand how to solve problems of this type.

It was concluded that such programs are beneficial for use in mathematics and programming classes. The game is currently being used at the Algoritmika school in classes for children aged 8–9.

Keywords: Scratch, educational game, logic puzzles, primary school, digital educational technologies, computational thinking, block-based programming, interactive learning, gamification, Krita.

Интеграция цифровых технологий в образовательную среду становится одним из ключевых направлений модернизации современной школы. Особую значимость это приобретает на уровне начального образования, где закладываются базовые когнитивные навыки, в том числе умение работать с задачами логического характера. Вместе с тем существующий арсенал цифровых учебных материалов нередко страдает фрагментарностью: отдельные задания или упражнения не образуют целостной методической системы, способной последовательно формировать нужные компетенции.

Среда визуального программирования Scratch (MIT Media Lab), созданная специально для детей, предоставляет уникальные возможности для разработки интерактивных обучающих программ без необходимости освоения синтаксиса традиционных языков программирования. Блочный принцип построения алгоритмов делает среду доступной для учащихся средней школы, позволяя при этом реализовывать полноценные образовательные сценарии.

Объектом настоящего исследования является образовательный процесс с использованием цифровых технологий. Предметом – методика создания и применения интерактивной обучающей игры в среде Scratch для развития навыков решения логических задач у младших школьников.

Цель работы: разработать и апробировать обучающую игру в Scratch, направленную на формирование у детей 7–9 лет умений решать логические задачи на сложение и вычитание.

Гипотеза исследования: систематическое использование интерактивных обучающих игр на занятиях по математике повышает учебную мотивацию и качество освоения вычислительных операций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) проанализировать потенциал среды Scratch для создания образовательного контента;

2) спроектировать сценарий и программный код обучающей игры с системой логических заданий;

3) провести апробацию игры и оценить её эффективность.

В ходе работы применялся комплекс методов: теоретический анализ литературы по вопросам цифровизации начального образования и игровых технологий обучения; метод проектирования – для разработки структуры игры, сценария и программного кода; педагогический эксперимент – для апробации созданного продукта; метод опроса – для сбора субъективных оценок учащихся; количественный анализ – для интерпретации полученных данных.

Теоретическую базу составили работы, посвящённые применению компьютерных технологий в начальной школе. Анализ отечественных и зарубежных исследований подтвердил, что умеренная интеграция интерактивных материалов в учебный процесс положительно влияет на мотивацию и успеваемость учащихся [1, 3]. Scratch был выбран инструментом реализации благодаря интуитивному интерфейсу, широким возможностям для анимации и встроенным механизмам обработки пользовательских действий [2, 4].

Разработка игры включала несколько взаимосвязанных этапов. На первом этапе был сформулирован образовательный сценарий: мультфильм-игра на тему «Гномы в автобусе», в которой ученик управляет посадкой и высадкой персонажей на остановках, а в финале отвечает на вопрос об оставшихся пассажирах. Сценарий обеспечивает нарративную мотивацию и последовательное усложнение вычислительной нагрузки.

На втором этапе создавались графические ресурсы: спрайты персонажей (гномы, Мистер Икс, автобус, остановка) и три фоновых изображения. Для отрисовки применялся растрово-векторный редактор Krita – профессиональный инструмент с открытым исходным кодом, поддерживающий работу со слоями, цифровую живопись и 2D-анимацию.

На третьем этапе реализована система заданий: учащийся перемещает спрайты гномов в соответствии с условием задачи (количество входящих и выходящих пассажиров задаётся на каждой остановке). Программный код предусматривает ограничение зон размещения: посадить гнома на крышу автобуса, кусты или на другого персонажа невозможно – соответствующие условия проверяются через блоки «касается» и координатные границы. Количество попыток ввода ответа не ограничено, что снижает стрессовую нагрузку.

На четвёртом этапе выполнялось многократное тестирование программного кода с целью выявления и устранения ошибок логики и отображения (дебаггинг).

Апробация разработанной игры проводилась на базе частной онлайн-школы математики и программирования «Алгоритмика». В тестировании участвовали 60 учеников второго класса в возрасте 7–8 лет. По завершении работы с программой учащимся предлагался устный опрос: «Понравилось ли вам задание в формате мультик-игры? Помогло ли оно научиться решать задачи?»

Полученные данные распределились следующим образом. Пятьдесят два ученика (86,7% выборки) дали положительный ответ: занятие оказалось интересным и помогло лучше разобраться в принципе решения задач данного типа. Шесть участников (10,0%) отметили высокую занимательность игрового формата, однако указали, что не смогли в полной мере осознать алгоритм решения задачи через сценарий. Один учащийся (1,7%) испытал затруднения при работе с интерфейсом программы. Один ученик не ответил на вопрос.

Таким образом, подавляющее большинство участников позитивно восприняли образовательный контент. Низкий процент затруднений при работе с интерфейсом свидетельствует об удовлетворительной эргономике разработанного продукта для целевой аудитории.

По итогам апробации игра была включена в регулярные занятия школы «Алгоритмика» – используется как интерактивное задание для детей 8–9 лет

и как основа для авторских мастер-классов. В настоящее время ведётся разработка следующего модуля серии: интерактивные весы для обучения решению задач на взвешивание.

Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями о позитивном влиянии геймификации на учебную мотивацию [3] и подтверждают гипотезу исследования о повышении интереса учащихся к математике при использовании игровых форм работы.

В рамках данной работы разработана и успешно апробирована интерактивная обучающая игра «Гномы в автобусе» в среде Scratch, направленная на формирование навыков решения логических задач на сложение и вычитание у младших школьников. Цель исследования достигнута, гипотеза подтверждена: игровой образовательный формат демонстрирует высокий уровень принятия среди целевой аудитории и способствует пониманию структуры вычислительной задачи.

Практическая значимость работы определяется реальным внедрением продукта в учебный процесс, его доступностью (среда Scratch и редактор Krita распространяются бесплатно) и тиражируемостью: педагоги и юные разработчики могут использовать описанный подход для создания аналогичных образовательных игр по другим темам начальной математики.

Перспективой дальнейшего развития проекта является расширение серии до полноценного цифрового курса нестандартных задач, включающего задания на взвешивание, переливание и другие логические сюжеты.

Список литературы

1. Голиков Д.В. Scratch для юных программистов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 192 с. – ISBN 978-5-9775-3739-1.

2. Голиков Д.В. Scratch 3 для юных программистов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 168 с. – ISBN 978-5-9775-6591-2.

3. Маржи М. Scratch для детей. Самоучитель по программированию. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2018. – 288 с. – ISBN 978-5-00117-424-0.

4. Официальный сайт платформы Scratch [Электронный ресурс]. – URL: https://scratch.mit.edu (дата обращения: 15.04.2026).

5. Вордерман К. и др. Программирование для детей. Иллюстрированное руководство по языкам Scratch и Python. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. – 224 с. – ISBN 978-5-00100-073-0.

6. Деменева Н.Н., Бондарева Н.И., Дедова О.Ю. Современные технологии проведения урока в начальной школе с учётом требований ФГОС. – М.: АРКТИ, 2019. – 152 с. – ISBN 978-5-89415-879-2.

7. Официальный сайт графического редактора Krita [Электронный ресурс]. – URL: https://krita.org (дата обращения: 15.04.2026).

Овчинников В. В.
д.т.н., заведующий кафедрой «Материаловедение»
Московский политехнический университет
Россия, Москва
vikov1956@mail.ru
Чуликова Ж.Е.
заведующий кафедрой «Техники и технологии промышленного и гражданского строительства»
Коломенский институт (филиал) Московский политехнический университет
Россия, Коломна
matriza_Janna@mail.ru
Берташюс И.А.
учащийся 11 класса
МОУ «Москворецкая гимназия»
Россия, Воскресенск
ilyabert@mail.ru

ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В ВЫБОРЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НОВЕЙШИХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. Оксидные стекла не подходят для работы в инфракрасных и ультрафиолетовых диапазонах, так как вызывают хроматические искажения. Нашей задачей будет подобрать материалы, позволяющие избегать аберраций света.

В работе математически исследовали свойства хроматических аберраций. На основе физических формул мы смогли получить зависимость разности фокусных расстояний для красного и синего цветов от показателей самой линзы. Это позволяет нам исследовать хроматические искажения, перебирая различные материалы.

Также в работе анализировали зависимость фокусного расстояния от характеристик линзы. Нам необходимо было достичь усредненного показателя преломления, в ином случае итоговое изображение ухудшится. Это позволило определить нам примерные ограничения показателя преломления линзы.

На основе полученной информации мы смогли составить программу, написанную на языке Python. Она позволяет автоматизировать процесс подбора различных оптических материалов. Вводя известные данные о качестве материала, можно будет определить разность фокусных расстояний и подобрать материал, испытывающий минимальные хроматические искажения. Также для подобранных материалов исследовали свойства анизотропии, а именно двойного лучепреломления.

Ключевые слова: хроматизм, число Аббе, фокусное расстояние, анизотропия, двойное лучепреломление, инфракрасные линзы, ультрафиолетовые линзы.

Ovchinnikov V V.
Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science
Moscow Polytechnic University
Russia, Moscow
vikov1956@mail.ru
Chulikova Zh.E.
Head of the Department of «Engineering and Technology of Industrial and Civil Engineering
Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University
Russia, Kolomna
matriza_Janna@mail.ru

Bertashus I.A.
11th grade student
Moskvoretskaya Gymnasium Educational Institution
Russia, Voskresensk
ilyabert@mail.ru

EFFECTIVE SOLUTIONS IN THE SELECTION OF MATERIALS FOR THE LATEST OPTICAL COMPLEXES

Abstract. Oxide glasses are not suitable for use in the infrared and ultraviolet ranges, as they cause chromatic distortion. Our task will be to select materials to avoid light aberration.

The paper mathematically investigated the properties of chromatic aberrations. Based on physical formulas, we were able to obtain the dependence of the difference in focal lengths for red and blue colors on the parameters of the lens itself. This allows us to explore chromatic distortion by going through different materials.

The work also analyzed the dependence of the focal length on the characteristics of the lens. We needed to achieve an average refractive index, otherwise the final image would deteriorate. This allowed us to determine the approximate limits of the refractive index of the lens.

Based on the information received, we were able to create a program written in Python. It allows you to automate the process of selecting various optical materials. By entering known data on the quality of the material, it will be possible to determine the focal length difference and select a material that experiences minimal chromatic distortion. The properties of anisotropy, namely double refraction, were also studied for the selected materials.

Keywords: chromaticism, Abbe number, focal length, anisotropy, double refraction, infrared lenses, ultraviolet lenses.

Цель исследования – подобрать эффективные материалы для оптических комплексов, при которых изображение будет достигаться четким и резким без хроматизма.

Задачи исследования:

1. Определить зависимость фокусного расстояния от показателя преломления линзы.

2. Определить связь разницы фокусных расстояний при разных цветах проходимого цвета.

3. Определить зависимость разности фокусных расстояний для синего и красного цветов от числа Аббе и показателя преломления.

4. Подобрать линзу такого материала, благодаря которому можно уменьшить хроматизм линзы. Важно достичь и не очень большого показателя преломления для избегания высоко фокусного расстояния, и высокого значения числа Аббе.

5. Определить свойства двулучепреломления для данных материалов.

Для решения сформулированных задач была разработана последовательность расчётно-теоретических шагов.

1. Определить зависимость фокусного расстояния от показателя преломления линзы. Из этого пункта следует формула:

$$F = \frac{R}{2(n-1)}$$

где F – фокус линзы, R – радиус кривизны линзы, n – показатель преломления линзы. Линзу будет считать выпуклой с обеих сторон с одинаковым радиусом.

2. Определить связь разницы фокусных расстояний при разных цветах проходимого цвета.

$$\nu = \frac{n-1}{n_c - n_k}$$

где $\nu -$ число Аббе, n – показатель преломления линзы, $n_c -$ показатель преломления для синего цвета, n_k- показатель преломления для красного цвета. Выражение $n_c - n_k$ является табличным и фиксируется ГОСТ 3514-94.

3. Изучая красные и синие лучи, можно понять, что их фокусные расстояния разные.

Тогда имеем следующие формулы:

$$\begin{cases} \nu = \frac{n-1}{n_c - n_k} \\ \frac{1}{F_c} = (n_c - 1) \cdot k \\ \frac{1}{F_k} = (n_k - 1) \cdot k \\ \frac{1}{F} = (n-1) \cdot k \\ k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ F_k \approx F_c \approx F \end{cases}$$, откуда следует формула:

$$\Delta F = \frac{R}{2\nu(n-1)}$$

где $F_k - F_c = \Delta F$ – разность фокусных расстояний красного и синего цветов соответственно, R1, R2 = R – радиус кривизны линзы, n – показатель преломления линзы, $\nu -$ число Аббе. Число Аббе является табличным значением. Тогда нашей задачей является сделать разницу фокусных расстояний минимальной за счет выбора материала.

В ходе исследовательской работы на базе Коломенского института был проведён эксперимент, целью которого являлось определение показателя преломления материала линзы. Для этого использовался метод Бесселя, позволяющий с высокой точностью измерить фокусное расстояние линзы на оптической скамье. Зная фокусное расстояние и радиусы кривизны поверхностей линзы, далее по формуле линзы мы опытным путем рассчитали искомый показатель преломления.

Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Определение показателя преломления n по результатам измерений

№ Опыта	x1, мм	x2, мм	l=x1-x2, мм	L, мм	F=(L^2-l^2)/2, мм	R1,мм	R2, мм	n
1	460	727	267	600	120,29625	125,1	125,1	1,519966333
2				60	15			#DIV/0!
3				60	15			#DIV/0!

4. Исходя из значения номинального фокуса линзы, была определена разность фокусов для синего и красного лучей (ΔF) для различных марок стекла. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Сравнение материалов при фиксированном номинальном фокусе линзы

№	Материал	Ист.	(n)	(V)	ΔFΔF, мм
1	ЛК1	ГОСТ	1,4414	68,54	14,59
2	ЛК3	ГОСТ	1,4891	69,87	14,31
3	ФК14	ГОСТ	1,5821	64,82	15,43
4	ТФК11	ГОСТ	1,6038	65,84	15,19
5	К8	ГОСТ	1,5183	63,83	15,67
6	К15	ГОСТ	1,5359	55,19	18,12
7	БК4	ГОСТ	1,5324	60,23	16,60
8	БК8	ГОСТ	1,5489	62,59	15,98
9	ТК4	ГОСТ	1,6138	55,55	18,00
10	ТК12	ГОСТ	1,5710	62,68	15,95
11	СТК8	ГОСТ	1,7065	49,41	20,24
12	ОК1	ГОСТ	1,5239	75,93	13,17
13	ОК3	ГОСТ	1,4419	92,00	10,87
14	КФ4	ГОСТ	1,5203	58.72	17,03
15	БФ11	ГОСТ	1,6251	52,84	18,93
16	ТБФ3	ГОСТ	1,7602	40,87	24,47
17	плавленый кварц	Alkor	1,458	67,7	14,77
18	CaF_2	Alkor	1,434	95,1	10,52
19	MgF_2	Alkor	1,413	106,2	9,42
20	Сапфир	Alkor	1,768	72,2	13,85
К – крон, Ф – фосфатный, ТФ – тяжелый фосфатный, Б – баритоновый, Т-тяжелый, СТ – сверхтяжелый, О – особый, КФ – кронфлинт, БФ – баритоновый клинт, ТБФ – тяжелый баритоновый флинт.					

Важно учитывать двулучепреломление – термин, который означает эффект расщепления луча света на две составляющие при прохождении через

анизотропную среду. Его испытывают Сапфир и MgF_2. В оптических приборах оно будет приводить расщеплению луча, следовательно к ухудшению качества изображения.

Основываясь на таблице 2, можно сказать, что лучшими являются фторидные материалы. Тогда для достижения лучших показателей необходимо взять фторид кальция CaF_2, который также имеет самую низкую разность фокусных расстояний.

Методика оценки результатов эксперимента

Перенеся полученные данные в массив данных в Python, можно сравнить необходимые материалы. Методика расчета основана на формулах, выведенных выше. Были визуализированы табличные значения, подсчитанные в программе. Код программы можно прочесть ниже

Код программы в Python для выбора оптического материала

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox
import math
import matplotlib.pyplot as plt
materials = [
    {«name»: «ЛК1», «n»: 1.4414, «V»: 68.54, «df»: 14.59},
    {«name»: «ЛК3», «n»: 1.4891, «V»: 69,87, «df»: 14.31},
    {«name»: «ФК14», «n»: 1.5821, «V»: 64,82, «df»: 15.43},
    {«name»: «ТФК11», «n»: 1.6038, «V»: 65,84, «df»: 15.19},
    {«name»: «К8», «n»: 1.5183, «V»: 63,83, «df»: 15.67},
    {«name»: «К15», «n»: 1.5359, «V»: 55.19, «df»: 18.12},
    {«name»: «БК4», «n»: 1.5324, «V»: 60.23, «df»: 16.60},
    {«name»: «БК8», «n»: 1.5489, «V»: 62.59, «df»: 15.98},
    {«name»: «ТК4», «n»: 1.6138, «V»: 55.55, «df»: 18.00},
    {«name»: «ТК12», «n»: 1.5710, «V»: 62.68, «df»: 15.95},
    {«name»: «СТК8», «n»: 1.7065, «V»: 49.41, «df»: 20.24},
    {«name»: «ОК1», «n»: 1.5239, «V»: 75.93, «df»: 13.17},
    {«name»: «ОК3», «n»: 1.4419, «V»: 92.00, «df»: 10,87},
    {«name»: «КФ4», «n»: 1.5203, «V»: 58.72, «df»: 17.03},
    {«name»: «БФ11», «n»: 1.6251, «V»: 52,84, «df»: 18.93},
    {«name»: «ТБФ3», «n»: 1.7602, «V»: 40,87, «df»: 24.47},
    {«name»: «Fused Silica», «n»: 1.4580, «V»: 67.70, «df»: 14.77},
    {«name»: «CaF2», «n»: 1.4340, «V»: 95.10, «df»: 10.52},
    {«name»: «MgF2», «n»: 1.4130, «V»: 106.20, «df»: 9.42},
    {«name»: «Sapphire», «n»: 1.7680, «V»: 72.20, «df»: 13,85},
    {«name»: «BaF2», «n»: 1.4740, «V»: 81.90, «df»: 12.21},
    {«name»: «LiF», «n»: 1.3910, «V»: 97.29, «df»: 10.28},
]def nearest_material(n_value, v_value=None):
    best = None
    best_dist = None
    for m in materials:
    if v_value is None:
    dist = abs(m[«n»] – n_value)
    else:
    dist = math.sqrt((m[«n»] – n_value) ** 2 + ((m[«V»] – v_value) / 100) ** 2)
    if best_dist is None or dist < best_dist:
    best_dist = dist
    best = m
    return best
def get_extremes():
    min_m = min(materials, key=lambda m: m[«df»])
    max_m = max(materials, key=lambda m: m[«df»])
    return min_m, max_m
```

```
    def draw_graph():
        try:
        n_value = float(entry_n.get().replace(«,», «.»))
        except ValueError:
        messagebox.showerror(«Ошибка», «Введите корректное значение n»)
        return
        raw_v = entry_v.get().strip()
        if raw_v == ««:
        v_value = None
        else:
        try:
        v_value = float(raw_v.replace(«,», «.»))
        except ValueError:
        messagebox.showerror(«Ошибка», «Введите корректное значение V или оставьте поле пустым»)
        return
        best = nearest_material(n_value, v_value)
        min_m, max_m = get_extremes()
        x = [m[«n»] for m in materials]
        y = [m[«V»] for m in materials]
        plt.figure(figsize=(10, 7))
        plt.scatter(x, y, s=60)
        for m in materials:
        plt.annotate(
        m[«name»],
        (m[«n»], m[«V»]),
        xytext=(4, 4),
        textcoords=«offset points»,
        fontsize=8          )
        plt.scatter(best[«n»], best[«V»], s=140, marker=«s», label=f'Ближайший: {best[«name»]}')
        plt.scatter(min_m[«n»], min_m[«V»], s=140, marker=«^», label=f'Мин. хроматизм:
{min_m[«name»]}')
        plt.scatter(max_m[«n»], max_m[«V»], s=140, marker=«v», label=f'Макс. хроматизм:
{max_m[«name»]}')
        if v_value is not None:
        plt.scatter(n_value, v_value, s=160, marker=«x», linewidths=2.5, label=«Введённая точка»)
        else:
        plt.axvline(n_value, linestyle=«–», linewidth=2, label=f»Введённое n = {n_value:.4f}»)
        plt.xlabel(«Показатель преломления n»)
        plt.ylabel(«Число Аббе V»)
        plt.title(«График зависимости V от n»)
        plt.grid(True, alpha=0.35)
        plt.legend()
        plt.tight_layout()
        plt.show()
        update_result(best, min_m, max_m, v_value)
    def update_result(best, min_m, max_m, v_value):
        for row in result_table.get_children():
        result_table.delete(row)
        result_table.insert(««, «end», values=(best[«name»], f'{best[«n»]:.4f}', f'{best[«V»]:.2f}',
f'{best[«df»]:.2f}'))
        result_table.insert(««, «end», values=(min_m[«name»], f'{min_m[«n»]:.4f}', f'{min_m[«V»]:.2f}',
f'{min_m[«df»]:.2f}'))
        result_table.insert(««, «end», values=(max_m[«name»], f'{max_m[«n»]:.4f}', f'{max_m[«V»]:.2f}',
f'{max_m[«df»]:.2f}'))
        if v_value is not None and v_value != 0:
        label_user_df.config(text=f»Для введённого V: Δf ≈ {1000 / v_value:.2f} мм»)
        else:
        label_user_df.config(text=««)
    def add_material():
        name = entry_name.get().strip()
        raw_n = entry_add_n.get().strip()
        raw_v = entry_add_v.get().strip()
```

```
            if not name:
            messagebox.showerror(«Ошибка», «Введите название материала»)
            return
            try:
            n_value = float(raw_n.replace(«,», «.»))
            v_value = float(raw_v.replace(«,», «.»))
            except ValueError:
            messagebox.showerror(«Ошибка», «n и V должны быть числами»)
            return
            df_value = 1000 / v_value
            materials.append({
            «name»: name,
            «n»: n_value,
            «V»: v_value,
            «df»: round(df_value, 2)          })
            materials_table.insert(««,      «end»,      values=(name,      f»{n_value:.4f}»,      f»{v_value:.2f}»,
f»{df_value:.2f}»))
            entry_name.delete(0, tk.END)
            entry_add_n.delete(0, tk.END)
            entry_add_v.delete(0, tk.END)
        def fill_materials_table():
            for row in materials_table.get_children():
            materials_table.delete(row)
            for m in materials:
            materials_table.insert(««,      «end»,      values=(m[«name»],      f'{m[«n»]:.4f}',      f'{m[«V»]:.2f}',
f'{m[«df»]:.2f}'))
        root = tk.Tk()
        root.title(«Меню ввода материалов и график V(n)»)
        root.geometry(«1180x760»)
        # Верхняя панель ввода
        frame_top = ttk.LabelFrame(root, text=«Ввод точки для анализа»)
        frame_top.pack(fill=«x», padx=10, pady=10)
        ttk.Label(frame_top, text=«n:»).grid(row=0, column=0, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        entry_n = ttk.Entry(frame_top, width=15)
        entry_n.insert(0, «1.52»)
        entry_n.grid(row=0, column=1, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        ttk.Label(frame_top, text=«V:»).grid(row=0, column=2, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        entry_v = ttk.Entry(frame_top, width=15)
        entry_v.grid(row=0, column=3, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        ttk.Button(frame_top,      text=«Построить      график»,      command=draw_graph).grid(row=0,      column=4,
padx=10, pady=6)
        label_user_df = ttk.Label(frame_top, text=««)
        label_user_df.grid(row=1, column=0, columnspan=5, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        # Средняя панель добавления материала
        frame_add = ttk.LabelFrame(root, text=«Добавление материала в таблицу»)
        frame_add.pack(fill=«x», padx=10, pady=10)
        ttk.Label(frame_add, text=«Название:»).grid(row=0, column=0, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        entry_name = ttk.Entry(frame_add, width=20)
        entry_name.grid(row=0, column=1, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        ttk.Label(frame_add, text=«n:»).grid(row=0, column=2, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        entry_add_n = ttk.Entry(frame_add, width=12)
        entry_add_n.grid(row=0, column=3, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        ttk.Label(frame_add, text=«V:»).grid(row=0, column=4, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        entry_add_v = ttk.Entry(frame_add, width=12)
        entry_add_v.grid(row=0, column=5, padx=6, pady=6, sticky=«w»)
        ttk.Button(frame_add,      text=«Добавить      в      таблицу»,      command=add_material).grid(row=0,      column=6,
padx=10, pady=6)
        # Таблица материалов
        frame_table = ttk.LabelFrame(root, text=«Таблица материалов»)
        frame_table.pack(fill=«both», expand=True, padx=10, pady=10)
        materials_table = ttk.Treeview(
            frame_table,
```

```
        columns=(«name», «n», «V», «df»),
        show=«headings»,
        height=15)
materials_table.heading(«name», text=«Материал»)
materials_table.heading(«n», text=«n»)
materials_table.heading(«V», text=«V»)
materials_table.heading(«df», text=«Δf, мм»)
materials_table.column(«name», width=220, anchor=«center»)
materials_table.column(«n», width=120, anchor=«center»)
materials_table.column(«V», width=120, anchor=«center»)
materials_table.column(«df», width=120, anchor=«center»)
materials_table.pack(fill=«both», expand=True, padx=6, pady=6)
# Таблица результатов
frame_result = ttk.LabelFrame(root, text=«Результаты»)
frame_result.pack(fill=«x», padx=10, pady=10)
result_table = ttk.Treeview(
        frame_result,
        columns=(«name», «n», «V», «df»),
        show=«headings»,
        height=3)
result_table.heading(«name», text=«Материал»)
result_table.heading(«n», text=«n»)
result_table.heading(«V», text=«V»)
result_table.heading(«df», text=«Δf, мм»)
result_table.column(«name», width=220, anchor=«center»)
result_table.column(«n», width=120, anchor=«center»)
result_table.column(«V», width=120, anchor=«center»)
result_table.column(«df», width=120, anchor=«center»)
result_table.pack(fill=«x», padx=6, pady=6)
fill_materials_table()
root.mainloop()
```

Результат работы в программе представлен на рисунке.

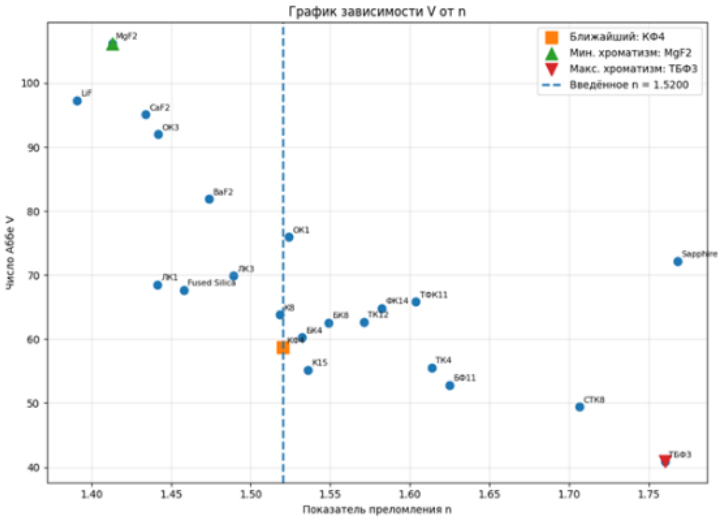


Рис. Зависимость числа Аббе от показателя преломления

Тогда, опираясь на построенный график и множестве точек видно, что лучшие показатели – невысокий показатель преломления (в ином случае фокусное расстояние будет большим, а следовательно картинка будет размываться) и высокое значение Аббе достигают фторидные материалы, такие как: MgF_2, CaF_2, LiF.

При выборе оптимального материала важно также избежать двулучепреломления в линзе. Это будет встречаться в анизотропных материалах, где для одной поляризации показатель один, а для другой уже будет совсем отличаться. Как раз MgF_2 является именно таким.

Тогда наиболее оптимальным будет CaF_2. Он имеет малую разницу фокусных расстояний, что позволит избежать хроматизм линзы.

То есть мы смогли достичь поставленные цели. CaF_2 имеет невысокий показатель преломления и высокое число Аббе, что позволяет хорошо избегать хроматизма линзы и улучшает качество изображения.

1. На основании таблицы 1 показано, что минимальные значения ΔF=9,42–13,17 мм соответствуют фторидные материалы: MgF_2, CaF_2, LiF, а также ОК1 и ОК3. Максимальные значения ΔF= 20–24 мм получены для стекол СТК8, ТБФ3.

2. Экспериментально, с помощью метода Бесселя на оптической скамье, определён показатель преломления линзы (например, для первого опыта $n \approx 1{,}520$). Эксперимент подтвердил работоспособность предложенных расчётных формул.

3. Построен график зависимости числа Аббе от показателя преломления с помощью Python (рисунок), который наглядно показывает, что фторидные материалы (MgF_2, CaF_2, LiF, BaF_2, ОК3, ОК1) имеют высокое числа Аббе ν (более 75) и умеренные коэффициенты преломления n (1,39–1,53), что соответствует критерию минимизации хроматизма.

4. Исследовано явление двулучепреломления: установлено, что анизотропные материалы (например, MgF_2, сапфир) могут вызывать расщепление луча, что ухудшает качество изображения. Поэтому при выборе материала предпочтение отдаётся изотропным фторидам, таким как CaF_2.

5. Разработана методика оценки результатов эксперимента, включающая расчёт разности фокусных расстояний ΔF по выведенным формулам, визуализацию данных в Python и учёт дополнительных факторов (двулучепреломление). Методика позволяет объективно сравнивать оптические материалы.

6. В ходе работы доказано, что фторидные материалы (особенно CaF_2) обеспечивают малую разность фокусов ($\Delta F \approx 10{,}5$ мм) при высоком числе Аббе (≈95) и умеренном показателе преломления (≈1,43), что делает их оптимальными для использования в тепловизионных системах, приборах наблюдения, беспилотной технике и поисковых дронах.

7. Подобран эффективный материал – фторид кальция CaF_2, позволяющий получать чёткое и резкое изображение без хроматических аберраций, с минимальным смещением цветовых фокусов и отсутствием нежелательного двулучепреломления.

Таким образом, на основе теоретического вывода формулы разности фокусных расстояний $\Delta F = R/(2\nu(n-1))$, экспериментальных результатов (таблица 1) и проверки по табличным данным (таблица 2) установлено, что

наилучшими характеристиками обладает фторид кальция (CaF_2). Практическая значимость применения CaF_2 в оборонных оптических комплексах очень велика: он позволяет регистрировать тепловое излучение объектов (ракет, беспилотников, перемещений противника) с высокой точностью, без цветовых ореолов и смещения фокусов. Материал уже широко используется в приборах наблюдения, тепловизорах, газоанализаторах и лазерной технике. Благодаря своей универсальности фторид кальция может быть как высокотехнологичным оптическим кристаллом (в линзах, окнах, спектрометрах), так и важнейшим компонентом в других отраслях (металлургия, химия, стоматология), что еще раз подтверждает его ценность.

Список литературы

1. Андреев Л.Н. Прикладная теория аберраций. Часть первая / Л.Н. Андреев, В.В. Ежова // СПб: Университет ИТМО. 2020.
2. Сенькин С.И. Хрупкое разрушение сплава 18-8: причины и последствия / С.И. Сенькин, Ж.Е. Чуликова // В сборнике трудов конференции: Новые технологии высшей школы = new technologies in higher education. Материалы Всероссийской научно-практической конференции Московского Политеха. Москва, 2025. – С. 319–322.
3. Чуликова Ж.Е. Живучесть стали 08Х18Н10Т при кратковременных испытаниях / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников // В сборнике трудов конференции: Научные исследования – основа современной инновационной системы. Материалы международной научно-практической конференции. Саратов, 2025. – С. 161–165.
4. Научно-технический прогресс: информация, технологии, механизм: Монография / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников [и др.]. Уфа: ООО «Аэтерна», 2025. 256 с.
5. Чуликова Ж.Е. Пути повышения срока эксплуатации нефтеперерабатывающего оборудования / Ж. Е. Чуликова, В. В. Овчинников [и др.]. Москва: Вестник машиностроения: Инновационное машиностроение, 2026. № 1. – С. 76–81.

Научное электронное издание

СМиС-2026. ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Материалы Международной научно-технической конференции
(Россия, Москва, 21–23 мая 2026 г.)

SMaC 2026. QUALITY MANAGEMENT TECHNOLOGIES

Proceedings of the International Scientific and Technical Conference
(Moscow, May 21–23, 2026)

Составители: **Адылина** Анна Петровна**, Клочкова** Дарья Андреевна,
Ливитин Владислав Романович

Разработано с помощью программного обеспечения
Microsoft Office Word, Adobe Acrobat Pro

Издается в авторской редакции

Ответственный за выпуск *А.В. Куркова*
Компьютерная верстка: *Н.Р. Гуськова*
Подписано к использованию 22.09.2026
Объем издания 29,7 Мб. Тираж 15. Заказ № 51/26
Издательство Московского Политеха
107023, Москва, Большая Семёновская, 38
www.mospolytech.ru; e-mail: izdat.mospolytech@yandex.ru