

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце: **МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФИО: Максимов Алексей Борисович
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Должность: директор департамента по образовательной политике
«**МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**»

Дата подписания: 02.09.2023 16:18:14

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Уникальный программный ключ:

8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

УТВЕРЖДЕНО

Декан Факультета урбанистики и
городского хозяйства

К.И. Лушин

2022г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Проектирование теплообменных аппаратов»

Направление подготовки

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки

Распределенная тепловая энергетика

Квалификация (степень) выпускника

Магистр

Форма обучения

Очная и заочная

1. Цели освоения дисциплины

К **основным целям** освоения дисциплины «Проектирование тепломассообменных аппаратов» следует отнести:

- формирование знаний о современных принципах, методах и средствах проектирования специальных теплообменных аппаратов;
- выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать и решать задачи проектирования тепломассообменных аппаратов;
- подготовка студентов к деятельности в соответствии с квалификационной характеристикой магистра по направлению, в том числе формирование умений по выявлению необходимых усовершенствований и разработке новых, более эффективных методов проектирования тепломассообменных аппаратов.

К **основным задачам** освоения дисциплины «Проектирование тепломассообменных аппаратов» следует отнести:

- выработать навыки у студентов самостоятельно формулировать задачи проектирования тепломассообменных аппаратов и использования их в промышленных установках;
- научить мыслить системно на примерах повышения энергетической эффективности энергетических установок с учетом технологических, экологических и экономических факторов;
- научить анализировать существующие методики проектирования тепломассообменных аппаратов и внедрять необходимые изменения в их структуре с позиций повышения эффективности и энергосбережения;
- дать информацию о новых методах проектирования тепломассообменных аппаратов в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать преимущества и недостатки систем использования и передачи теплоты;
- научить анализировать результаты моделирования тепломассообменных аппаратов, производить поиск оптимизационного решения для теплоэнергетических систем.

2. Место дисциплины в структуре ООП магистратуры

Дисциплина «Проектирование тепломассообменных аппаратов» относится к числу профессиональных учебных дисциплин по выбору базового цикла основной образовательной программы магистратуры.

Дисциплина «Проектирование тепломассообменных аппаратов» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

- Проектирование и эксплуатация теплоэнергетических установок;
- Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок;
- Проектирование и эксплуатация источников и систем теплоснабжения;

- Проблемы энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологии;
- Проектирование и эксплуатация систем отопления и вентиляции;
- Технологии энергосбережения.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения дисциплины (модуля) у обучающихся формируются следующие компетенции и должны быть достигнуты следующие результаты обучения как этап формирования соответствующих компетенций:

Код компетенции	В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
ПК-2	способность к организации работы проектного подразделения по разработке систем внутреннего теплоснабжения, отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, воздушного отопления, противодымной вентиляции	<p>знать: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p> <p>уметь: обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов;</p> <p>владеть: методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p>

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **5** зачетных единиц, т.е. **180** академических часов (из них для очной 120 часа – самостоятельная работа студентов и для заочной 126 часа).

Четвертый семестр:

для очной формы: аудиторных занятий – 60 часов, форма контроля – экзамен;

для заочной формы: аудиторных занятий – 54 часов, форма контроля – экзамен.

Разделы дисциплины «Проектирование теплообменных

аппаратов» изучаются на втором курсе в **четвертом** семестре.

Структура и содержание дисциплины «Проектирование теплообменных аппаратов» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

Содержание разделов дисциплины

Четвертый семестр

Тема 1. Введение

Предмет, задачи и содержание дисциплины. Место теплообменных аппаратов в структуре энергетического комплекса предприятия. Принципы эффективного проектирования и моделирования теплообменных аппаратов. Основные термины и определения.

Тема 2. Инженерные методы проектирования компактных теплообменников

Общие вопросы проектирования теплообменных аппаратов. Требования, предъявляемые к теплообменным устройствам систем искусственного климата различного назначения. Классификация теплообменных аппаратов, применяемых в специальных системах искусственного климата и их назначение. Основные характеристики компактных теплообменников и методы их определения. Особенности расчёта коэффициентов теплопередачи и эффективности оребренных поверхностей

Автоматизированное проектирование теплообменных аппаратов. Блок-схемы машинных методов проектирования теплообменных аппаратов с учетом относительности движения потоков и фазовых превращений теплоносителей. Учет ограничений на геометрические и функциональные параметры.

Тема 3. Температурные поля в конструкциях компактных теплообменников и их термическая эффективность

Методы анализа и выбора поверхностей теплообмена. Методы определения эффективности теплообмена оребренных поверхностей, анализ одномерных и двухмерных температурных полей в теплообменниках для различных условий теплообмена с окружающей средой, различных схем относительного движения теплоносителей и различного характера потоков в гладкоканальных и жалюзийных гофрах и при поперечном омывании трубного пучка.

Проектирование воздушно-жидкостных испарительных теплообменников, предназначенных для работы в условиях перегрузок и невесомости. Способы сепарации влаги в испарительных теплообменниках. Капиллярные и пленочные испарители.

Особенности проектирования топливо-воздушных теплообменников. Многопоточные теплообменники.

Тема 4. Особенности конструкций и расчёта холодильно-сушильных агрегатов

Специальные теплотехнические устройства систем обеспечения теплового режима космических аппаратов.

Теплообменники влажного воздуха. Назначение и принцип работы холодильно-сушильных агрегатов. Особенности конструкций и методов расчета конденсаторов осушителей. Методы удаления и сбора конденсата в условиях невесомости. Основы расчета капиллярных конденсаторов.

Тема 5. Теплообменные устройства систем термостабилизации радиоэлектронных приборов

Методы расчета испарительных и проточных теплоплат для охлаждения радиоэлектронного оборудования. Определение температурных полей в зоне подвода теплоты.

Тема 6. Радиационные теплообменники космических аппаратов

Классификация конструкций радиаторов-излучателей. Эффективность излучающих ребер. Оптические свойства излучающих поверхностей и их влияние на температурный режим радиатора. Методы расчета радиационных теплообменников. Методы достижения заданной надёжности при существовании вероятности метеоритного пробоя поверхности.

Тема 7. Основы теории и расчёта молярных теплопроводов

Физические основы молярных теплопроводов. Теплопроводы и замкнутые испарительно-конденсационные системы как молярные теплопроводы. Принцип устройства и функционирования. Классификация теплопроводов по температурным уровням, конструктивному оформлению, организации движения теплоносителя, назначению. Физические условия переноса тепла и массы в теплопроводах, режимы их работы.

Проектирование теплопроводов с гомогенной фитильной структурой. Структурные и переносные характеристики гомогенных фитильных структур. Гидродинамический и термодинамический анализ процессов переноса тепла и массы в теплопроводах с сетчатой фитильной структурой. Анализ распределения температур по зонам переноса. Ограничения теплопередающей способности теплопроводов.

Инженерные методы расчета сетчатых теплопроводов и способы представления их рабочих характеристик. Номографические методы расчета и построения рабочих характеристик и линий проводимости.

Проектирование теплопроводов с гетерогенной фитильной структурой. Особенности переноса тепла и массы в теплопроводах с аксиальными и резьбовыми капиллярными канавками. Структурное распределение жидкости в единичной канавке. Интенсивность переноса тепла при испарении и конденсации жидкости на развитых поверхностях.

Регулирование характеристик теплопроводов. Способы регулирования

рабочих характеристик тепловых труб. Понятие о чувствительности и пределах регулирования. Влияние температуры и объёма нейтрального газа на предел регулирования температуры. Оценка влияния давления заполнения и способа охлаждения на рабочие характеристики газорегулируемых тепловых труб.

5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Проектирование теплообменников аппаратов» и реализация компетентного подхода в изложении и восприятии материала предусматривает использование следующих активных и интерактивных форм проведения групповых, индивидуальных, аудиторных занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся:

- подготовка к выполнению практических работ в аудиториях вуза и на мощностях предприятий-партнеров;
- подготовка, представление и обсуждение презентаций на семинарских занятиях;
- организация и проведение текущего контроля знаний студентов в форме бланкового тестирования;
- использование интерактивных форм текущего контроля в форме аудиторного и внеаудиторного интернет-тестирования;
- проведение мастер-классов экспертов и специалистов по методам современного проектирования и 3D-моделирования теплообменников аппаратов, а также эффективных методов эксплуатации оборудования и объектов энергетических промышленных систем.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определен главной целью образовательной программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием дисциплины **«Проектирование теплообменников аппаратов»**.

Проведение занятий предусматривается также на сайте <http://online.mospolytech.ru> на основе разработанных кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» электронных образовательных ресурсов (ЭОР) по всем темам дисциплины:

Дисциплина	Ссылка
Проектирование теплообменников аппаратов	https://online.mospolytech.ru/local/crw/course.php?id=4172

Разработанные ЭОР включают промежуточные и итоговые тесты.

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

В процессе обучения используются следующие оценочные формы самостоятельной работы студентов, оценочные средства текущего контроля успеваемости и промежуточных аттестаций:

Во втором семестре:

- подготовка и выступление на семинарском занятии с презентацией и обсуждением на тему «Современные методы проектирования тепломассообменных аппаратов» (индивидуально для каждого обучающегося);

- выполнение тестового задания (по вариантам)».

Оценочные средства текущего контроля успеваемости включают контрольные вопросы и задания в форме бланкового и (или) компьютерного тестирования, для контроля освоения обучающимися разделов дисциплины, защита отчетов по расчетной работе.

Образцы тестовых заданий, заданий расчетных работ, контрольных вопросов и заданий для проведения текущего контроля, приведены в приложениях.

6.1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

6.1.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы

В результате освоения дисциплины (модуля) формируются следующие компетенции:

Код компетенции	В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать
ПК-2	способность к организации работы проектного подразделения по разработке систем внутреннего теплоснабжения, отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, воздушного отопления, противодымной вентиляции

В процессе освоения образовательной программы данные компетенции, в том числе их отдельные компоненты, формируются поэтапно в ходе освоения обучающимися дисциплин (модулей), практик в соответствии с учебным планом и календарным графиком учебного процесса.

6.1.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций, формируемых по итогам освоения дисциплины (модуля), описание шкал оценивания

Показателем оценивания компетенций на различных этапах их формирования является достижение обучающимися планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю).

ПК-2 - способность к организации работы проектного подразделения по разработке систем внутреннего теплоснабжения, отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, воздушного отопления, противодымной вентиляции				
Показатель	Критерии оценивания			
	Оценка «неудовлетворительно» или отсутствие сформированности компетенции	Оценка «удовлетворительно» или низкой уровень освоения компетенции	Оценка «хорошо» или повышенный уровень освоения компетенции	Оценка «отлично» или высокий уровень освоения компетенции
знать: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, свободно оперирует приобретенными знаниями.

		их переносе на новые ситуации.		
уметь: Обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов	Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.

<p>владеть: методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p>	<p>Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p>	<p>Обучающийся владеет методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования в неполном объеме, допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях.</p>	<p>Обучающийся частично владеет методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.</p>	<p>Обучающийся в полном объеме владеет методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.</p>
--	---	---	---	--

Шкалы оценивания результатов промежуточной аттестации и их описание:

Форма промежуточной аттестации: экзамен.

Промежуточная аттестация обучающихся в форме экзамена проводится по результатам выполнения всех видов учебной работы, предусмотренных учебным планом по данной дисциплине (модулю), при этом учитываются результаты текущего контроля успеваемости в течение семестра. Оценка степени достижения обучающимися планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю) проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине (модулю) методом экспертной оценки. По итогам промежуточной аттестации по дисциплине (модулю) выставляется оценка «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

К промежуточной аттестации допускаются только студенты, выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные рабочей программой по дисциплине «Использование вторичных энергоресурсов в

промышленности» (прошли промежуточный контроль, выполнили весь объем заданий на семинарских занятиях, выступили с докладом на семинарском занятии)

Шкала оценивания	Описание
Отлично	Выполнены все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом. Студент демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателей, оперирует приобретенными знаниями, умениями, навыками, применяет их в ситуациях повышенной сложности. При этом могут быть допущены незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации.
Хорошо	Студент показывает достаточный уровень теоретических и практических знаний, свободно оперирует категориальным аппаратом. Умеет анализировать практические ситуации, но допускает некоторые погрешности. Ответ построен логично, материал излагается грамотно.
Удовлетворительно	Студент показывает знание основного лекционного и практического материала. В ответе не всегда присутствует логика изложения. Студент испытывает затруднения при приведении практических примеров.
Неудовлетворительно	Не выполнен один или более видов учебной работы, предусмотренных учебным планом. Студент демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателей, допускаются значительные ошибки, проявляется отсутствие знаний, умений, навыков по ряду показателей, студент испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации.

Фонды оценочных средств представлены в приложениях к рабочей программе.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Моисеев Б.В. Промышленная теплоэнергетика [Электронный ресурс]: учеб. / Б.В. Моисеев, Ю.Д. Земенков, С.Ю. Торопов. — Электрон. дан. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. — 236 с.

2. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочная серия: В 4 кн. Кн. 4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник [Электронный ресурс]: справ. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. — 632 с.

3. Сазанов Б.В. Промышленные теплоэнергетические установки и системы: учеб. пособие для вузов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. — 275 с.

4. Бакланова В.Г. Теплообменные аппараты низкотемпературных установок и систем термостатирования. Часть 1. «Аппараты трубчатого и пластинчато-ребристого типов» [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Г. Бакланова, Ю.А. Шевич. — Электрон. дан. — Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 68 с.

5. Теплообменные аппараты ТЭС: справочник: в 2 кн. Книга 1 [Электронный ресурс]: справ. / Даминов А.З. [и др.]. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. — 490 с.

б) дополнительная литература:

1. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2013. — 384 с.

2. Теплоэнергетические установки: Сборник нормативных документов [Электронный ресурс]: сб. — Электрон. дан. — Москва: ЭНАС, 2013. — 384 с.

3. Таранова Л.В. Теплообменные аппараты и методы их расчета: учебное пособие [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. — 152 с.

4. Дюкова И.Н. Газодинамический и тепловой расчет теплообменного аппарата: методические указания [Электронный ресурс]: метод. указ. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2012. — 24 с.

5. Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок [Электронный ресурс]: справ. / Бродов Ю.М. [и др.]. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. — 480 с.

6. Лавыгин В.М., Теплообменные аппараты ТЭС: учеб. пособие для вузов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Лавыгин В.М., Назмеев Ю.Г.. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. — 269 с.

в) программное обеспечение и интернет-ресурсы:

Программное обеспечение не предусмотрено.

Интернет-ресурсы включают учебно-методические материалы в электронном виде, представленные на сайте (<http://lib.mami.ru/ebooks/> в разделе «Библиотека»).

Полезные учебно-методические и информационные материалы представлены на сайтах:

http://window.edu.ru/catalog/resources?p_nr=50&p_rubr=2.2.75.27.7&p_page=3;

<http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-laboratornoy-ustanovki-po-spetsialnosti-promyshlennaya-teploenergetika>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Специализированная учебная лаборатория кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Ауд. АВ2406, оснащенная лабораторными установками:

- «Определение коэффициента температуропроводности стали методом регулярного режима»;
- «Определение коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе (труба в трубе)»;
- «Определение коэффициента теплопередачи методом регулярного режима»;
- «Определение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости на цилиндре»;
- «Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом цилиндрического слоя».

Мультимедийная аудитория кафедры «Промышленная теплоэнергетика», оснащенная оргтехникой и мультимедиа средствами (проектор, ПК и др.), экспериментальная котельная на базе ОАО ВТИ (на основании Договора о сотрудничестве) с системой КИП и автоматики.

9. Методические рекомендации для самостоятельной работы студентов

1. Марюшин Л.А., Сенникова О.Б., Савельев И.Л. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов. Направление подготовки: 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Распределенная тепловая энергетика». – М.: Изд-во Московского политеха, - 46 с.

10. Методические рекомендации для преподавателя

Преподавание дисциплины «Проектирование тепломассообменных аппаратов» имеет своей целью ознакомить студентов с достижениями в области прикладной теплоэнергетики, добиться уяснения ими основных правил расчета, проектирования и эксплуатации тепломассообменных аппаратов в теплоэнергетике, порядка их применения, привить им практические навыки использования этих знаний к конкретным жизненным ситуациям.

Преподавание дисциплины осуществляется в соответствии с ФГОС ВО.

Целью методических рекомендаций является повышение эффективности теоретических и практических занятий вследствие более четкой их организации преподавателем, создания целевых установок по каждой теме, систематизации материала по курсу, взаимосвязи тем курса, полного материального и методического обеспечения образовательного процесса.

Средства обеспечения освоения дисциплины

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие средства:

- рекомендуемую основную и дополнительную литературу;
- методические указания и пособия;
- контрольные задания для закрепления теоретического материала;
- электронные версии федеральных законов, учебников и методических указаний для выполнения практических работ и самостоятельной работы магистров.

Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Для максимального усвоения дисциплины рекомендуется изложение лекционного материала с элементами обсуждения.

В качестве методики проведения практических занятий можно предложить

1. Семинар – обсуждение существующих точек зрения на проблему и пути ее решения.
2. Тематические доклады, позволяющие вырабатывать навыки публичных выступлений.

Для максимального усвоения дисциплины рекомендуется проведение письменного опроса (тестирование) магистров по материалам лекций и практических работ. Подборка вопросов для тестирования осуществляется на основе изученного теоретического материала. Такой подход позволяет повысить мотивацию магистров при конспектировании лекционного материала.

Для освоения навыков поисковой и исследовательской деятельности магистр пишет контрольную работу или реферат по выбранной (свободной) теме.

Лекции проводятся в основном посредством метода устного изложения с элементами проблемного подхода и беседы.

Семинарские занятия могут иметь разные формы (работа с исследовательской литературой, анализ данных нормативной и справочной литературы, слушание докладов и др.), выбираемые преподавателем в зависимости от интересов магистров и конкретной темы.

Самостоятельная работа магистров включает в себя элементы реферирования и конспектирования научно-исследовательской литературы, подготовки и написания научных текстов, отработку навыков устных публичных выступлений.

Проверка качества усвоения знаний в течение семестра осуществляется в устной форме, путем обсуждения проблем, выводимых на семинарах и письменной, путем выполнения магистрами разных по форме и содержанию работ и заданий, связанных с практическим освоением содержания дисциплины. Магистры демонстрируют в ходе проверки умение анализировать значимость и выявлять специфику различных проблем и тем в рамках изучаемой дисциплины и ее компонентов, знание научной и учебно-методической литературы. Текущая проверка знаний и умений магистров также осуществляется через проведение ряда промежуточных тестирований.

Итоговая аттестация по дисциплине предполагает устный зачет или экзамен, на которых проверяется усвоение материала, усвоение базовых понятий дисциплины.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций ПрООП ВО по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и профилю «Распределенная тепловая энергетика»

Авторы

Профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика»
д.т.н., профессор

С.Д. Корнеев

Доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»
к.т.н., доцент

Л.А. Марюшин

Программа обсуждена на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика». Протокол от 26 мая 2022 г. № 11.

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»
к.т.н., доцент

Л.А. Марюшин

Руководитель ООП

В.С. Тимохин

**Структура и содержание дисциплины «Проектирование теплообменных аппаратов»
по направлению подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
(магистр)**

	Раздел	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов, и трудоемкость в часах					Виды самостоятельной работы студентов					Формы аттестации		
				Л	П/С	Лаб	СРС	КСР	К.Р.	К.П.	РГР	Реф.	К/р	Э	З	
	Четвёртый семестр															
Тема 1	Лекция. Введение	4	1	2			10									
	Семинарское занятие				2											
Тема 2	Лекция. Инженерные методы проектирования компактных теплообменников	4	2	2			10									
	Семинарское занятие				4						+					
Тема 3	Лекция. Температурные поля в конструкциях компактных теплообменников и их термическая эффективность	4	3	2			10									
	Семинарское занятие				4								+			
Тема 4	Лекция. Особенности конструкций и расчёта холодильно-сушильных агрегатов	4	4	2			10									
	Семинарское занятие				4							+				
Тема 5	Лекция. Теплообменные устройства систем термостабилизации радиоэлектронных приборов	4	5	2			20									
	Семинарское занятие				4											
Тема 6	Лекция. Радиационные теплообменники космических аппаратов	4	6	4			20									
	Семинарское занятие				6								+			
Тема 7	Лекция. Основы теории и расчёта молярных теплопроводов	4	7-9	6			40									

	Семинарское занятие				12										
	Итоговое тестирование				4										
	Форма аттестации	4	10-11											Э	
	Всего часов по дисциплине в четвертом семестре														

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

Направление подготовки: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
ОП (профиль): «Распределенная тепловая энергетика»
Форма обучения: Очная, заочная

Кафедра: «Промышленная теплоэнергетика»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Проектирование теплообменных аппаратов»

Таблица 1
к приложению 2

Паспорт фонда оценочных средств

Проектирование теплообменных аппаратов

ФГОС ВО 13.04.01 Теплотехника и теплоэнергетика

КОМПЕТЕНЦИИ		Перечень компонентов	Технология формирования	Форма оценочного средства	Степени уровней освоения компетенций
ИНДЕКС	ФОРМУЛИРОВКА				
ПК-2	готовность к обеспечению бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов	Знать: правила обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов	Лекция, семинарские занятия, решение ситуационных задач, СРС	Экзамен, выполнение расчетной работы по индивидуальному заданию, тестирование	<p>Базовый уровень: способен обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов в стандартных производственных ситуациях</p> <p>Повышенный уровень: способен обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом</p>

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы в рамках учебной дисциплины

Перечень практических работ по дисциплине

1. Расчет пластинчатого рекуператора.
2. Расчет змеевикового теплообменника с оребрением теплопередающей поверхности.
3. Расчёт температурных полей и эффективности одноходового или двухходового по холодному потоку теплообменника с перекрёстным током теплоносителей.
4. Проектный (по сухому воздуху) и поверочный (по влажному воздуху) расчёт холодильно - сушильного агрегата.
5. Проектный расчёт космического радиационного теплообменника.
6. Расчёт линии проводимости для тепловой трубы с сетчатой фитильной структурой.
7. Решение задач оптимизации теплообмена.

Примеры задач для семинарских занятий

Задача 1. Выполнить расчет и подбор пароводяного подогревателя, исходя из следующих данных:

- Производительность установки $Q_{ВПСУ} = 11$ ГДж/ч;
- Максимальная температура пара $t_{нар} = 121$ °С;
- Максимальная температура воды на выходе из пароводяного подогревателя $t_{н2} = 111$ °С;
- Максимальная температура конденсата на входе в охладитель конденсата $t_{с1} = 121$ °С;
- Максимальная температура конденсата на выходе из охладителя конденсата $t_{с2} = 95$ °С;
- Температура нагреваемой воды на входе в водоподогревательную установку $t_{н1} = 70$ °С.

По заданию сетевая водоподогревательная установка состоит из двух блоков, в состав которых входят пароводяной теплообменник и охладитель пара.

Принципиальная схема сетевой водоподогревательной установки:

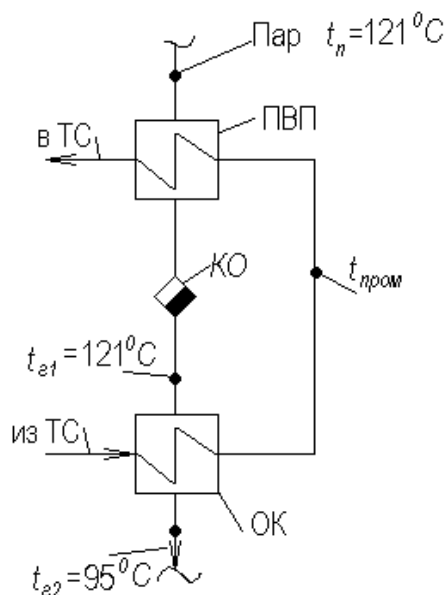


Рис. 1. Принципиальная схема сетевой водоподогревательной установки:

ПВП – пароводяной подогреватель; ОК – охладитель конденсата;

КО – конденсатоотводчик

Производим расчет одного блока, производительность которого определяется по формуле:

$$Q_{бл} = \frac{Q_{ВПСУ}}{2} = \frac{11}{2} = 5,5 \text{ ГДж/ч,}$$

где: $Q_{ВПСУ}$ – производительность установок, ГДж/ч;

Расход нагреваемой воды G_2 находим по формуле:

$$G_2 = \frac{Q_{\text{бл}} 1000}{c(t_{n2} - t_{n1})} = \frac{5,5 \cdot 1000}{4,19(111 - 70)} = 32,02 \text{ т/ч},$$

где: $Q_{\text{бл}}$ – теплопроизводительность блока, ГДж/ч;

c – теплоемкость, кДж/кг⁰С;

t_{n1} , t_{n2} – температура воды на входе и выходе из подогревателя.

Теплопроизводительность пароводяного подогревателя $Q_{\text{ПВП}}$ определяется по формуле:

$$Q_{\text{ПВП}} = \frac{Q_{\text{бл}} r}{r + (t_{\text{пар}} - t_{22})} = \frac{5,5 \cdot 519,3}{519,3 + (121 - 95)} = 5,238 \text{ ГДж/ч},$$

где: $Q_{\text{бл}}$ – теплопроизводительность блока, ГДж/ч;

r – удельная теплота парообразования, $r = 525,4$ ккал/кг;

$t_{\text{пар}}$ – температура пара, ⁰С;

t_{22} – температура конденсата на выходе из охладителя конденсата, ⁰С.

Расход пара G_1 определяется по формуле:

$$G_1 = \frac{Q_{\text{ПВП}} 1000}{cr} = \frac{5,238 \cdot 1000}{4,19 \cdot 525,4} = 2,379 \text{ т/ч}$$

Теплопроизводительность охладителя конденсата $Q_{\text{ок}}$ определяем по уравнению:

$$Q_{\text{ок}} = Q_{\text{бл}} - Q_{\text{ПВП}} = 5,5 - 5,238 = 0,262 \text{ ГДж/ч},$$

где: $Q_{\text{бл}}$ – теплопроизводительность блока, ГДж/ч;

$Q_{\text{ПВП}}$ – теплопроизводительность подогревателя, ГДж/ч;

Температура нагреваемой воды в точке между охладителем конденсата и пароводяным подогревателем $t_{\text{пром}}$ определяется по формуле:

$$t_{\text{пром}} = t_{n1} + \frac{Q_{\text{ок}}}{c \cdot G_2} = 70 + \frac{0,262 \cdot 10^3}{4,19 \cdot 32,02} = 71,95 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где: t_{n1} – температура нагреваемой воды на входе в водоподогреватель, ⁰С;

G_2 – расход нагреваемой воды, т/ч;

$Q_{\text{ок}}$ – теплопроизводительность охладителя конденсата, ГДж/ч;

c – теплоемкость, кДж/кг⁰С;

Выбор типоразмера пароводяного подогревателя производим по расчетной площади сечения трубок, определяемой из формулы расхода воды:

$$G_2 = 3,6 \cdot \omega_2 \cdot \rho_2 \cdot f_{\text{труб}}^{\text{расч}},$$

где: G_2 – расход нагреваемой воды, т/ч;

ω_2 – скорость нагреваемой воды, м/с;

ρ_2 – плотность нагреваемой воды, кг/м³;

Плотность определяется, исходя из выражения:

$$\rho_2 = 1000,3 - 0,06 \cdot \bar{t}_2 - 0,0036 \cdot \bar{t}_2^2,$$

где \bar{t} – средняя температура воды, ⁰С.

$$\bar{t}_2 = \frac{t_{n2} + t_{\text{пром}}}{2} = \frac{111 + 71,95}{2} = 91,475 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \rho_2 &= 1000,3 - 0,06 \cdot \bar{t}_2 - 0,0036 \cdot \bar{t}_2^2 \\ &= 1000,4 - 0,06 \cdot 91,475 - 0,0036 \cdot 91,475^2 \\ &= 964,78 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

Выражаем $f_{труб}^{расч}$, принимая скорость нагреваемой воды $\omega_2 = 1$ м/с:

$$f_{труб}^{расч} = \frac{G_2}{3,6\omega_2\rho_2} = \frac{32,02}{3,6 \cdot 1 \cdot 964,78} = 0,009219 м^2$$

По таблице технических характеристик горизонтальных пароводяных подогревателей по ОСТ 108.271.105 – 76 выбираем подогреватель ПП1 – 32–7 – IV со следующими характеристиками:

1. Диаметр корпуса $D_{корп} = 530$ мм;
2. Число ходов $z = 4$;
3. Длина трубок $L = 3000$ мм;
4. Число трубок $N_{труб} = 232$;
5. Площадь нагрева $F_{нагр} = 32,0$ м²;
6. Площадь трубок $f_{труб}^{табл} = 0,0090$ м²;
7. Площадь межтрубного пространства $f_{межстр} = 0,162$ м².

Используя табличные значения выполним пересчет скорости воды, м/с:

$$\omega_2 = \frac{G_2}{3,6 \cdot f_{труб}^{табл} \cdot \rho_2} = \frac{32,02}{3,6 \cdot 0,0090 \cdot 964,69} = 1,02 м/с$$

Находим коэффициент теплопередачи при турбулентном движении воды внутри трубок:

$$\alpha_2 = 4,19 \cdot (1210 + 18 \cdot \bar{t}_2 - 0,038 \cdot \bar{t}_2^2) \cdot \frac{\omega_2^{0,8}}{d_{вн}^{0,2}} =$$

$$= 4,19 \cdot (1210 + 18 \cdot 91,475 - 0,038 \cdot 91,475^2) \cdot \frac{1,02^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 25380 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр},$$

где: ω_2 – скорость нагреваемой воды, м/с;

\bar{t} – средняя температура воды, °С,

$d_{вн}$ – внутренний диаметр трубок, м.

Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке определяется по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{4,19 \cdot (4320 + 47,54 \cdot t_{нл} - 0,14 \cdot t_{нл}^2)}{\sqrt[4]{z_{нп} \cdot d_n \cdot (t_{нап} - t_{см})}},$$

где: $t_{нл}$ – температура пленки, °С, определяем по уравнению

$$t_{нл} = 0,5 \cdot (t_{нап} + t_{см}),$$

где: $t_{нап}$ – температура пара, °С;

$t_{см}$ – температура стенки, определяемая по формуле:

$$t_{см} = t_{нап} - \Delta t \cdot 0,5,$$

где: $t_{нас}$ – температура насыщенного пара, °С;

Δt – температурный напор, °С, определяемый:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}}$$

где: Δt_{δ} и Δt_m определяем по температурному графику:

$$\Delta t_m = t_{нап} - t_{н2} = 121 - 111 = 10^0 \text{С}$$

$$\Delta t_{\delta} = t_{нап} - t_{проп} = 121 - 71,95 = 49,05^0 \text{С}$$

$$\Delta t = \frac{49,05 - 10}{\ln \frac{49,05}{10}} = 24,556^{\circ}C$$

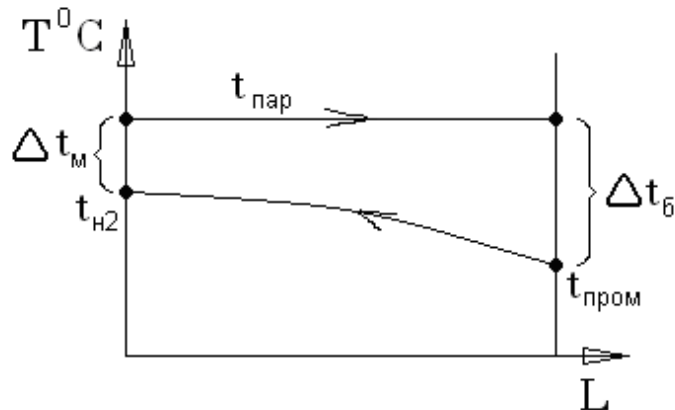


Рис. 2 График температур

$$t_{cm} = 121 - 24,556 \cdot 0,5 = 108,72^{\circ}C$$

$$t_{нл} = 0,5 \cdot (121 + 108,72) = 114,86^{\circ}C$$

Подставляя полученные данные в формулу, найдем коэффициент теплоотдачи от пара к стенке:

$$\alpha_1 = \frac{4,19 \cdot (4320 + 47,54 \cdot 114,86 - 0,14 \cdot 114,86^2)}{\sqrt[4]{15,232 \cdot 0,016 \cdot (121 - 108,72)}} = 25270 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$$

Расчетный коэффициент теплопередачи определяется по формуле для плоской стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

где: α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке и от стенки к нагреваемой воде, $\text{кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$;

$\delta_{cm}, \delta_{нак}$ – толщина стенки и толщина слоя накипи, м;

$\lambda_{cm}, \lambda_{нак}$ – коэффициенты теплопроводности для стенок труб и накипи, $\text{кДж/ч} \cdot \text{м} \cdot \text{гр}$.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{25270} + \frac{0,001}{4,19 \cdot 90} + \frac{0,0005}{4,19 \cdot 2} + \frac{1}{25380}} = 7078 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$$

Уточненное значение температуры стенок трубок

$$t_{cm} = \frac{t_{пар} \alpha_1 + \bar{t}_2 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} = \frac{121 \cdot 25270 + 91,475 \cdot 25380}{25270 + 25380} = 106,24^{\circ}C$$

Поскольку уточненное значение t_{cm} мало отличается от принятого для предварительного расчета, то пересчета величины коэффициента теплоотдачи от пара к стенке не производим.

Расчетная поверхность нагрева определяется по формуле, м^2 :

$$F = \frac{Q_{ПВП}}{k \cdot \Delta t}$$

где: $Q_{ПВП}$ – теплопроизводительность подогревателя, ГДж/ч;

k – коэффициент теплопередачи, $\text{кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$;

Δt – температурный напор, °С.

Тогда расчетная площадь нагрева равна:

Так как расчетная площадь нагрева меньше площади нагрева теплообменника, значит подбор теплообменника сделан верно с запасом по нагреваемой поверхности.

Далее находим расход пара, т/ч:

$$D = \frac{Q_{ПВП}}{4,19 \cdot (h'' - h')},$$

где: h'' и h' - энтальпия пара и воды при температуре 121°С;

$$D = \frac{5,238 \cdot 10^3}{4,19 \cdot (646,7 - 121,3)} = 2,379 \text{ т/ч}$$

Определяем гидравлические потери в подогревателе по формуле:

$$\Delta p = \left(\frac{\lambda_{тр} \cdot l \cdot z}{d_{вн}} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\omega_2^2 \cdot \rho_2}{2 \cdot 1000},$$

где: l – длина трубок, м;

z – число ходов;

ω_2 - скорость нагреваемой воды, м/с;

ρ_2 - плотность нагреваемой воды, кг/м³;

$\lambda_{тр}$ - коэффициент гидравлического трения, определяемый как:

$$\lambda_{тр} = 0,11 \cdot \left(\frac{K_{эkv}}{d_{вн}} \right)^{0,25},$$

где: $K_{эkv}$ - коэффициент эквивалентной шероховатости внутренней поверхности трубы $K_{эkv} = 0,2 \text{ мм}$

$$\lambda_{тр} = 0,11 \left(\frac{0,0002}{0,014} \right)^{0,25} = 0,038$$

$\sum \xi$ - сумма местных сопротивлений, определяемая из уравнения:

$$\sum \xi = z \cdot 4,75 = 4 \cdot 4,75 = 19.$$

Определим потери давления:

$$\Delta p = \left(\frac{0,038 \cdot 3 \cdot 4}{0,014} + 19 \right) \frac{1,02^2 \cdot 964,78}{2 \cdot 1000} = 25,88 \text{ кПа}$$

Для проверки правильности расчетов определим гидравлические потери в зависимости от коэффициента загрязнения $\psi = 2,3$

$$\Delta p = 9,81 \cdot (0,133 \cdot l_{тр} + 0,232) \cdot z \cdot \psi \cdot \omega^2,$$

где: l – длина трубок, м;

z – число ходов;

ω_2 - скорость нагреваемой воды, м/с;

ψ - коэффициент загрязнения.

$$\Delta p = (0,133 \cdot 3 + 0,232) \cdot 4 \cdot 2,3 \cdot 1,02^2 \cdot 9,81 = 56,67 \text{ кПа}$$

Эта формула показывает, что из-за загрязнения, образующегося на стенках трубы, потери давления возрастают в 2,2 раза.

Задача 2. Расчет и подбор охладителя конденсата.

Охладитель конденсата представляет собой водоводяной теплообменник. В качестве греющей среды используется конденсат с температурой на входе в теплообменник $t_{21} = 121^{\circ}\text{C}$ и температурой на выходе из охладителя конденсата $t_{22} = 95^{\circ}\text{C}$. Подбор и расчет охладителя конденсата проводится аналогично подбору и расчету пароводяного теплообменника, производится по площади сечения трубок, принимая скорость нагреваемой воды $\omega_2 = 1 \text{ м/с}$.

Плотность рассчитывается по формуле (1.8). Здесь средняя температура $\bar{t}_2^{ок}$ определяется:

$$\bar{t}_2^{ок} = \frac{t_{н1} + t_{пром}}{2} = \frac{70 + 71,95}{2} = 70,98^{\circ}\text{C}$$

Тогда найдем плотность нагреваемой воды:

$$\begin{aligned}\rho_2^{ок} &= 1000,3 - 0,06 \cdot \bar{t}_2^{ок} - 0,0036 \cdot \bar{t}_2^{ок^2} \\ &= 1000,3 - 0,06 \cdot 70,98 - 0,0036 \cdot 70,98^2 \\ &= 977,90 \text{ кг/м}^3\end{aligned}$$

Расход нагреваемой воды остается постоянным, определим расчетную поверхность труб:

$$f_{труб}^{расч} = \frac{G_2}{3,6 \cdot \omega_2 \cdot \rho_2} = \frac{32,02}{3,6 \cdot 1 \cdot 977,90} = 0,00909 \text{ м}^2$$

По таблице технических характеристик водоводяных подогревателей по ОСТ 34588-68 принимаем теплообменник №12, который имеет следующие конструктивные характеристики:

1. Диаметр корпуса $D_{корп} = 219/207 \text{ мм}$;
2. Длина трубок $L = 3000 \text{ мм}$;
3. Число трубок $N_{труб} = 64$;
4. Площадь нагрева $F_{секц} = 12,00 \text{ м}^2$;
5. Площадь сечения трубок $f_{труб}^{табл} = 0,00985 \text{ м}^2$;
6. Площадь межтрубного пространства $f_{межтр} = 0,02079 \text{ м}^2$;
7. Эквивалентный диаметр $D_{экв} = 0,0215 \text{ м}$;
8. Коэффициент $B_{мт} = 10$.

Действительная скорость нагреваемой воды определяется по формуле:

$$\omega_2 = \frac{G_2}{3,6 \cdot f_{труб}^{табл} \cdot \rho_2} = \frac{32,02}{3,6 \cdot 0,00985 \cdot 977,90} = 0,923 \text{ м/с}$$

Определим по аналогичной зависимости скорость конденсата в межтрубном пространстве:

$$\omega_{мжс} = \frac{G_1}{3,6 \cdot f_{межтр} \cdot \rho_1},$$

где: G_1 – расход конденсата, т/ч;

$f_{межтр}$ – площадь межтрубного пространства, м^2 ;

ρ_1 – плотность конденсата, кг/м^3 , определяется по формуле:

$$\rho_1^{ок} = 1000,3 - 0,06 \cdot \bar{t}_1 - 0,0036 \cdot \bar{t}_1^2,$$

где: \bar{t}_1 – средняя температура конденсата, $^{\circ}\text{C}$;

$$\bar{t}_1 = \frac{t_{21} + t_{22}}{2} = \frac{121 + 95}{2} = 108^{\circ}\text{C}$$

Подставляя значение средней температуры, определим плотность по:
 $\rho_1^{ок} = 1000,3 - 0,06 \cdot \bar{t}_1 - 0,0036 \cdot \bar{t}_1^2 = 1000,3 - 0,06 \cdot 108 - 0,0036 \cdot 108^2$
 $= 951,83 \text{ кг/м}^3$

Далее определим скорость конденсата:

$$\omega_{мжс} = \frac{G_1}{3,6 \cdot f_{межстр} \cdot \rho_1} = \frac{2,379}{3,6 \cdot 0,02079 \cdot 951,83} = 0,033 \text{ м/с}$$

Зная скорость конденсата и коэффициент, учитывающий конструкцию опор в межтрубном пространстве $\phi = 0,9$ (опоры-полки) определяем коэффициент теплоотдачи от конденсата к стенке трубок α_1 , $\text{кДж/чм}^2\text{гр}$, по формуле:

$$\alpha_1 = 4,19 \cdot \phi_1 \cdot (1210 + 18 \cdot \bar{t}_1 - 0,038 \cdot \bar{t}_1^2) \cdot \frac{\omega_{мжс}^{0,8}}{d_{экв}^{0,2}} =$$

$$= 4,19 \cdot 0,9 \cdot (1210 + 18 \cdot 108 - 0,038 \cdot 108^2) \cdot \frac{0,033^{0,8}}{0,0215^{0,2}}$$

$$= 1438 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$$

Коэффициент теплоотдачи нагреваемой воды определяется, с учетом $\phi_2 = 1$ (учитывает вид трубок, применяются гладкие):

$$\alpha_2 = 4,19 \cdot \phi_2 \cdot (1210 + 18 \cdot \bar{t}_2 - 0,038 \cdot \bar{t}_2^2) \cdot \frac{\omega_2^{0,8}}{d_{вн}^{0,2}} =$$

$$= 4,19 \cdot 1 \cdot (1210 + 18 \cdot 70,98 - 0,038 \cdot 70,98^2) \cdot \frac{0,923^{0,8}}{0,014^{0,2}}$$

$$= 19070 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$$

Определяем коэффициент теплопередачи аналогично как при расчете пароводяного подогревателя:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{1438} + \frac{0,001}{4,19 \cdot 90} + \frac{0,0005}{4,19 \cdot 2} + \frac{1}{19070}}$$

$$= 1234 \text{ кДж/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{гр}$$

Площадь поверхности нагрева определяется по формуле:

$$F = \frac{Q_{ок}}{k \cdot \Delta t_{ок}},$$

$\Delta t_{ок}$ – температурный напор, $^{\circ}\text{C}$, определяемый:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\sigma}}}{\Delta t_m}}$$

$$\Delta t_m = t_{22} - t_{н1} = 95 - 70 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\bar{\sigma}} = t_{нар} - t_{проп} = 121 - 71,95 = 49,05^{\circ}\text{C}$$

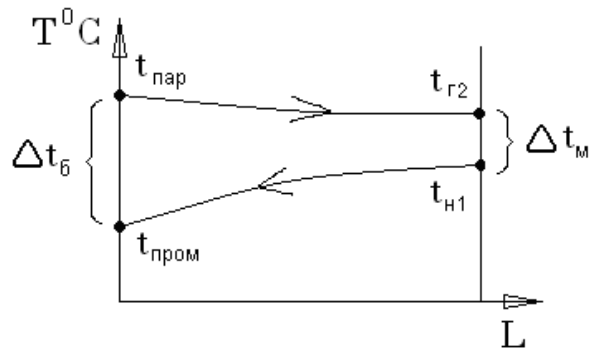


Рис. 3. График температур

$$\Delta t = \frac{49,05 - 25}{\ln \frac{49,05}{25}} = 35,68^{\circ}\text{C}$$

Расчетная площадь нагрева определяется из уравнения:

$$F = \frac{Q_{OK}}{k \cdot \Delta t_{OK}} = \frac{0,262 \cdot 10^6}{1234 \cdot 35,68} = 5,951 \text{ м}^2$$

Находим число секций подогревателя длиной 4м по формуле:

$$n_{расч} = \frac{F_{расч}}{F_{секц}}$$

где: $F_{расч}$ – расчетная площадь поверхности нагрева, м^2 ;

$F_{секц}$ – площадь поверхности нагрева одной секции, м^2 .

$$n_{расч} = \frac{5,951}{12,00} = 0,500$$

Устанавливаем одну секцию длиной 4 м.

Определим потери давления в охладителе конденсата Δp_k нагреваемой среды, исходя из формулы:

$$\Delta p_k = \psi \cdot B_2 \cdot \omega_2^2 \cdot n_{секц},$$

где: ω_2 – скорость нагреваемой воды, м/с;

$n_{секц}$ – приведенное количество секций;

ψ – коэффициент, учитывающий накипеобразование;

B_2 – потери давления в одной секции четырехметрового подогревателя, $B_2 = 7,5$ кПа

$$\Delta p_k = \psi \cdot B_2 \cdot \omega_2^2 \cdot n_{секц} = 2,5 \cdot 7,5 \cdot 0,923^2 \cdot 1 = 15,97 \text{ кПа}$$

Потери давления в межтрубном пространстве теплообменника определяются по формуле:

$$\Delta p_{гр} = B_1 \cdot \omega_1^2 \cdot n_{секц},$$

где: ω_1 – скорость греющей воды, м/с;

$n_{секц}$ – приведенное количество секций;

B_1 – потери давления в межтрубном пространстве, $B_1 = 10$ кПа

$$\Delta p_{гр} = 10 \cdot 0,033^2 \cdot 1 = 0,011 \text{ кПа}$$

Задача 3. Выполнить расчет пластинчатого теплообменника M10-BFG/L при следующих исходных данных:

1. Максимальная производительность теплообменника $Q_{зр}^{max} = 6301 \text{ МДж/ч}$;

2. Температура нагреваемой воды на входе в теплообменник $t_{н1} = 5^\circ\text{C}$;

3. Температура нагреваемой воды на выходе из теплообменника $t_{н2} = 60^\circ\text{C}$;

4. Температура греющей воды на входе в теплообменник $t_{г1} = 70^\circ\text{C}$;

5. Температура греющей воды на выходе из теплообменника $t_{г2} = 20^\circ\text{C}$.

Требования: располагаемые потери давления по ходу греющей и нагреваемой воды не должны превышать 20-60 кПа.

Решение

Расчет теплообменника начинаем с определения расходов греющей и нагреваемой среды по уравнению теплового баланса:

$$Q = c \cdot G_1 \cdot (t_{г1} - t_{г2}) \cdot k_{mn} = c \cdot G_2 \cdot (t_{н2} - t_{н1}),$$

$$G_1 = \frac{Q_{гв}^{max}}{c \cdot (t_{г1} - t_{г2})}, G_2 = \frac{Q_{гв}^{max}}{c \cdot (t_{н2} - t_{н1})}$$

где: $Q_{гв}^{max}$ - максимальное количество теплоты, выделяемое на горячее водоснабжение, МДж/ч ;

c - теплоемкость, $c = 4,19 \text{ МДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

$t_{г1}$ и $t_{г2}$ - соответственно температуры греющей среды на входе и выходе из теплообменника, $^\circ\text{C}$;

$t_{н1}$ и $t_{н2}$ - соответственно температуры нагреваемой среды на входе и выходе из теплообменника, $^\circ\text{C}$;

k_{mn} - коэффициент, учитывающий теплотери от корпуса ТО и от поверхности пластин в окружающую среду.

$$G_1 = \frac{6301}{4,19 \cdot (70 - 20)} = 30,076 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$G_2 = \frac{6301}{4,19 \cdot (60 - 5)} = 27,342 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Определяем температурный напор в теплообменном аппарате: по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{\delta}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\delta}}}{\Delta t_m}},$$

где: $\Delta t_{\bar{\delta}}$ - разность температур сред на выходе из теплообменника, $^\circ\text{C}$;

Δt_m - разность температур сред на входе в теплообменник, $^\circ\text{C}$.

$\Delta t_{\bar{\delta}}$ и Δt_m определяем по рис. 4 (график температур)

$$\Delta t_m = t_{г1} - t_{н2} = 70 - 60 = 10^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\bar{\delta}} = t_{г2} - t_{н1} = 20 - 5 = 15^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{\delta}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\delta}}}{\Delta t_m}} = \frac{15 - 10}{\ln \frac{15}{10}} = 12,332^\circ\text{C}$$

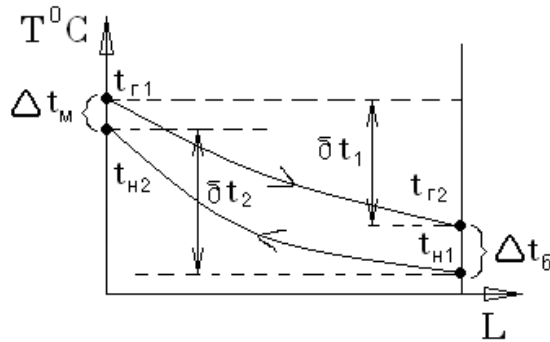


Рис.4. График температур

Температурный перепад будет равен:

$$\delta t_1 = t_{г1} - t_{г2} = 70 - 20 = 50^\circ C$$

$$\delta t_2 = t_{н2} - t_{н1} = 60 - 5 = 55^\circ C$$

Определим средние температуры греющего и нагреваемого теплоносителя:

$$t_{cp1} = \frac{t_{г1} - (t_{н2} + \Delta t) \cdot \frac{\delta t_1}{\delta t_2}}{1 - \frac{\delta t_1}{\delta t_2}}, \text{ } ^\circ C$$

$$t_{cp1} = \frac{70 - (60 + 12,332) \cdot \frac{50}{55}}{1 - \frac{50}{55}} = \frac{70 - (60 + 12,332) \cdot \frac{50}{55}}{1 - \frac{50}{55}} = 46,68, \text{ } ^\circ C$$

$$t_{cp2} = t_{cp1} - \Delta t = 46,68 - 12,332 = 34,348, \text{ } ^\circ C$$

Плотность нагреваемой и греющей воды, $\text{кг}/\text{м}^3$, находим по формуле:

$$\rho = 1000,3 - 0,06 \cdot t_{cp} - 0,0036 \cdot t_{cp}^2$$

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 1000,3 - 0,06 \cdot t_{cp1} - 0,0036 \cdot t_{cp1}^2 \\ &= 1000,3 - 0,06 \cdot 46,68 - 0,0036 \cdot 46,38^2 \\ &= 989,655, \text{ } \text{кг}/\text{м}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_2 &= 1000,3 - 0,06 \cdot t_{cp2} - 0,0036 \cdot t_{cp2}^2 \\ &= 1000,3 - 0,06 \cdot 34,35 - 0,0036 \cdot 34,35^2 \\ &= 993,992, \text{ } \text{кг}/\text{м}^3 \end{aligned}$$

Характеристики теплообменника M10-BFG:

- максимальное число пластин 275 шт.;
- высота теплообменника 981 мм;
- эквивалентный диаметр канала 4,93 мм;
- поверхность нагрева пластины $0,24 \text{ м}^2$;
- площадь живого сечения канала $0,000835 \text{ м}^2$;
- диаметр патрубков ($D_{нар}/D_{вн}$) 110/100 мм;
- коэффициент C в зависимости от типа каналов:
0,2347 (Н) 0,1666 (М) 0,1112 (L)
- коэффициент B в зависимости от типа каналов:
11,55 (Н) 8,20 (М) 5,47 (L)

- коэффициент B_k в зависимости от типа каналов:
249 (Н) 89,3 (М) 51,9 (L)
- коэффициент $B_n = 0,6$.

Примем число ходов, равным 4.

Определяем скорости движения нагреваемого и греющего теплоносителя:

$$\omega_n = \frac{G}{3,6 \cdot \rho \cdot f_{namp}}, \text{ м/с,}$$

где: G - расход греющей или нагреваемой среды, т/ч;

ρ - плотность нагреваемой и греющей воды, кг/м³;

f_{namp} - площадь живого сечения патрубка, м²

$$f_{namp} = \frac{\pi \cdot D_{вн}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2$$

$$\omega_{n1} = \frac{G_1}{3,6 \cdot \rho_1 \cdot f_{namp}} = \frac{30,076}{3,6 \cdot 989,655 \cdot 0,00785} = 1,075 \text{ м/с}$$

$$\omega_{n2} = \frac{G_2}{3,6 \cdot \rho_2 \cdot f_{namp}} = \frac{27,342}{3,6 \cdot 993,992 \cdot 0,00785} = 0,973 \text{ м/с}$$

Определим потери напора в патрубках:

$$\Delta p_n = 0,001 \cdot B_n \cdot \rho \cdot \omega_n^2,$$

где: B_n – коэффициент, учитывающий потери напора в зависимости от типа подогревателя, кПа.

$$\Delta p_{n1} = 0,001 \cdot B_n \cdot \rho_1 \cdot \omega_{n1}^2 = 0,001 \cdot 0,6 \cdot 989,655 \cdot 1,075^2 = 0,686 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{n2} = 0,001 \cdot B_n \cdot \rho_2 \cdot \omega_{n2}^2 = 0,001 \cdot 0,6 \cdot 993,992 \cdot 0,973^2 = 0,564 \text{ кПа}$$

Определяем максимально возможные потери напора в каналах:

$$\Delta p_k^{пред} = \Delta p_{расч} - \Delta p_n,$$

где: $\Delta p_{расч}$ - располагаемые потери давления по ходу теплоносителя, в расчетах принимаем верхний предел, равный 60 кПа.

$$\Delta p_{к1}^{пред} = \Delta p_{расч} - \Delta p_{n1} = 60 - 0,686 = 59,314 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{к2}^{пред} = \Delta p_{расч} - \Delta p_{n2} = 60 - 0,564 = 59,436 \text{ кПа}$$

Далее определяем ориентировочную скорость нагреваемой воды в каналах:

$$\omega_{к2}^{пред} = \sqrt{\frac{\Delta p_{к2}^{пред}}{0,001 \cdot B_k \cdot \rho_2 \cdot x}}, \text{ м/с}$$

где: x – число ходов;

B_k – коэффициент, учитывающий потери напора в каналах, зависит от конструктивных особенностей подогревателя, кПа.

$$\omega_{к2}^{пред} = \sqrt{\frac{\Delta p_{к2}^{пред}}{0,001 \cdot B_k \cdot \rho_2 \cdot x}} = \sqrt{\frac{59,436}{0,001 \cdot 51,9 \cdot 993,992 \cdot 4}} = 0,537 \text{ м/с}$$

Определим число каналов по нагреваемой воде:

$$N = \frac{G_2}{\omega_{k2}^{пред} \cdot \rho_2 \cdot f_{кан} \cdot 3,6},$$

где: $f_{кан}$ - площадь живого сечения канала, m^2

$$N = \frac{G_2}{\omega_{k2}^{пред} \cdot \rho_2 \cdot f_{кан} \cdot 3,6} = \frac{27,342}{0,537 \cdot 993,992 \cdot 0,000835 \cdot 3,6} = 17,051 шт$$

Принимаем к установке 17 штук.

Уточняем скорости движения воды:

$$\omega^{факт} = \frac{G}{3,6 \cdot N_{уст} \cdot \rho \cdot f_{кан}}, м/с$$

$$\omega_1^{факт} = \frac{G_1}{3,6 \cdot N_{уст} \cdot \rho_1 \cdot f_{кан}} = \frac{30,076}{3,6 \cdot 17 \cdot 989,655 \cdot 0,000835} = 0,595, м/с$$

$$\omega_2^{факт} = \frac{G_2}{3,6 \cdot N_{уст} \cdot \rho_2 \cdot f_{кан}} = \frac{27,342}{3,6 \cdot 17 \cdot 993,992 \cdot 0,000835} = 0,538, м/с$$

Теперь можно найти коэффициент теплоотдачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где: α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от греющего теплоносителя к стенке и от стенки к нагреваемой воде, $кДж/ч \cdot м^2 \cdot гр$;

$\delta_{ст}, \delta_{нак}$ – толщина стенки и толщина слоя накипи, м;

$\lambda_{ст}, \lambda_{нак}$ – коэффициенты теплопроводности для стенок труб и накипи, $кДж/ч \cdot м \cdot гр$.

$$\alpha = c \cdot V \cdot (1559 + 16,5 \cdot t_{cp} - 0,043 \cdot t_{cp}^2) \cdot (\omega^{факт})^{0,7},$$

где: V – коэффициент, зависящий от типа теплообменного аппарата.

а) теплоотдача от греющего теплоносителя к стенкам пластин:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= c \cdot V \cdot (1559 + 16,5 \cdot t_{cp1} - 0,043 \cdot t_{cp1}^2) \cdot (\omega_1^{факт})^{0,7} = \\ &= 4,19 \cdot 5,47 \cdot (1559 + 16,5 \cdot 46,68 - 0,043 \cdot 46,68^2) \cdot 0,595^{0,7} = \\ &= 35610 кДж/ч \cdot м^2 \cdot гр \end{aligned}$$

б) теплоотдача от стенок пластин к нагреваемому теплоносителю:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= c \cdot V \cdot (1559 + 16,5 \cdot t_{cp2} - 0,043 \cdot t_{cp2}^2) \cdot (\omega_2^{факт})^{0,7} = \\ &= 4,19 \cdot 5,47 \cdot (1559 + 16,5 \cdot 34,35 - 0,043 \cdot 34,35^2) \cdot 0,538^{0,7} = \\ &= 30830 кДж/ч \cdot м^2 \cdot гр \end{aligned}$$

$$R_{ст} = \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} = \frac{0,0005}{13,07 \cdot 4,19} = 9,1 \cdot 10^{-6} м^2 \cdot гр \cdot ч/кДж$$

$$R_{нак} = \frac{\delta_{нак}}{\lambda_{нак}} = \frac{0,0001}{2 \cdot 4,19} = 11,9 \cdot 10^{-6} м^2 \cdot гр \cdot ч/кДж$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{35610} + \frac{0,0005}{13,07 \cdot 4,19} + \frac{0,0001}{2 \cdot 4,19} + \frac{1}{30830}} = 12260 кДж/ч \cdot м^2 \cdot гр$$

Определяем площадь нагрева:

$$F_{нагр} = \frac{Q_{зр}^{макс} \cdot 10^3}{k \cdot \Delta t} = \frac{6301 \cdot 10^3}{12260 \cdot 12,332} = 41,685, м^2$$

Определим количество пластин:

$$n_{пл} = \frac{F_{нагр}}{F_{пл}},$$

где: $F_{пл}$ - площадь нагрева одной пластины, $м^2$.

$$n_{пл} = \frac{F_{нагр}}{F_{пл}} = \frac{41,685}{0,24} = 173,69шт.$$

Принимаем к установке 174 пластины.

Уточняем потери напора:

$$\Delta p_k = B_k \cdot \rho \cdot (\omega^{факт})^2.$$

$$\Delta p = \Delta p_n + \Delta p_k$$

$$\Delta p_{к1} = B_{к1} \cdot \rho_1 \cdot \omega_1^{факт} = 51,9 \cdot 989,655 \cdot 0,595^2 = 18,17кПа$$

$$\Delta p_{к2} = B_{к2} \cdot \rho_2 \cdot \omega_2^{факт} = 51,9 \cdot 993,992 \cdot 0,538^2 = 14,95кПа$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_{n1} + \Delta p_{к1} = 0,686 + 18,17 = 18,86кПа$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_{n2} + \Delta p_{к2} = 0,564 + 14,95 = 15,51кПа.$$

Полные потери давления удовлетворяют условию максимально допустимого значения потерь давления $\Delta p \leq 60 кПа$, поэтому подбор числа пакетов и количества каналов осуществлен верно.

Вопросы к экзамену

1. Общие вопросы проектирования тепломассообменных аппаратов.
2. Требования, предъявляемые к тепломассообменным устройствам систем искусственного климата различного назначения.
3. Классификация теплообменных аппаратов, применяемых в специальных системах искусственного климата и их назначение.
4. Основные характеристики компактных теплообменников и методы их определения.
5. Особенности расчёта коэффициентов теплопередачи и эффективности оребренных поверхностей.
6. Автоматизированное проектирование теплообменных аппаратов.
7. Блок-схемы машинных методов проектирования теплообменных аппаратов с учетом относительности движения потоков и фазовых превращений теплоносителей.
8. Учет ограничений на геометрические и функциональные параметры.
9. Методы анализа и выбора поверхностей теплообмена.
10. Методы определения эффективности теплообмена оребренных поверхностей.
11. Анализ одномерных и двумерных температурных полей в теплообменниках для различных условий теплообмена с окружающей средой.
12. Анализ одномерных и двумерных температурных полей в теплообменниках для различных схем относительного движения теплоносителей и различного характера потоков в гладкоканальных и жалюзийных гофрах и при поперечном омывании трубного пучка.
13. Проектирование воздушно-жидкостных испарительных теплообменников, предназначенных для работы в условиях перегрузок и невесомости.
14. Способы сепарации влаги в испарительных теплообменниках. Капиллярные и пленочные испарители.
15. Особенности проектирования топливо-воздушных теплообменников. Многопоточные теплообменники.
16. Специальные теплотехнические устройства систем обеспечения теплового режима космических аппаратов.
17. Теплообменники влажного воздуха.
18. Назначение и принцип работы холодильно-сушильных агрегатов.
19. Особенности конструкций и методов расчета конденсаторов осушителей.
20. Методы удаления и сбора конденсата в условиях невесомости. Основы расчета капиллярных конденсаторов.
21. Методы расчета испарительных и проточных термоплат для охлаждения радиоэлектронного оборудования.

22. Определение температурных полей в зоне подвода теплоты.
23. Классификация конструкций радиаторов-излучателей.
24. Эффективность излучающих ребер.
25. Оптические свойства излучающих поверхностей и их влияние на температурный режим радиатора.
26. Методы расчета радиационных теплообменников.
27. Методы достижения заданной надёжности при существовании вероятности метеоритного пробоя поверхности.
28. Физические основы молярных теплопроводов.
29. Тепловые трубы и замкнутые испарительно-конденсационные системы как молярные теплопроводы.
30. Принцип устройства и функционирования тепловых труб.
31. Классификация тепловых труб по температурным уровням, конструктивному оформлению, организации движения теплоносителя, назначению.
32. Физические условия переноса тепла и массы в тепловых трубах, режимы их работы.
33. Проектирование тепловых труб с гомогенной фитильной структурой.
34. Структурные и переносные характеристики гомогенных фитильных структур.
35. Гидродинамический и термодинамический анализ процессов переноса тепла и массы в тепловых трубах с сетчатой фитильной структурой.
36. Анализ распределения температур по зонам переноса.
37. Ограничения теплопередающей способности тепловых труб.
38. Инженерные методы расчета сетчатых тепловых труб и способы представления их рабочих характеристик.
39. Номографические методы расчета и построения рабочих характеристик и линий проводимости.
40. Проектирование тепловых труб с гетерогенной фитильной структурой.
41. Особенности переноса тепла и массы в тепловых трубах с аксиальными и резьбовыми капиллярными канавками.
42. Структурное распределение жидкости в единичной канавке.
43. Интенсивность переноса тепла при испарении и конденсации жидкости на развитых поверхностях.
44. Регулирование характеристик тепловых труб.
45. Способы регулирования рабочих характеристик тепловых труб.
46. Понятие о чувствительности и пределах регулирования.
47. Влияние температуры и объёма нейтрального газа на предел регулирования температуры.
48. Оценка влияния давления заполнения и способа охлаждения на рабочие характеристики газорегулируемых тепловых труб.