

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной политике
Дата подписания: 01.09.2023 12:28:58
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

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

УТВЕРЖДЕНО
Декан Факультета урбанистики и
городского хозяйства
Марюшин Л.А.
« 30 » *августа* 2021г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Современные энергетические технологии»

Направление подготовки
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки
Распределенная тепловая энергетика

Квалификация (степень) выпускника
Магистр

Форма обучения
Очная, очно-заочная

Москва
2021

1. Цели освоения дисциплины

К **основным целям** освоения дисциплины «Современные энергетические технологии» следует отнести:

- формирование знаний о современных проблемах теплоэнергетики, теплотехники и теплотехнологий при проектировании и эксплуатации энергетических установок и систем;
- изучение способов повышения эффективности энергооборудования и систем, выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать и решать задачи современной теплоэнергетики;
- подготовка студентов к деятельности в соответствии с квалификационной характеристикой бакалавра по направлению, в том числе формирование умений по выявлению необходимых усовершенствований и разработке новых, более эффективных методов обеспечения экологической безопасности источников и систем теплоснабжения.

К **основным задачам** освоения дисциплины «Современные энергетические технологии» следует отнести:

- выработать навыки у студентов самостоятельно формулировать задачи теплоэнергетики, теплотехники и теплотехнологий;
- научить мыслить системно на примерах внедрения современного энергетического оборудования с учетом технологических и экономических факторов;
- научить анализировать существующие достижения в области прикладной науки, разрабатывать и внедрять необходимые изменения в технике с позиций повышения ее эффективности;
- дать информацию о новых направлениях теплоэнергетики, теплотехники и теплотехнологий в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать преимущества и недостатки современной техники;
- научить анализировать результаты моделирования штатных ситуаций, производить поиск оптимизационного решения с помощью всевозможных методов.

2. Место дисциплины в структуре ООП магистратуры

Дисциплина «Современные энергетические технологии» относится к числу профессиональных учебных дисциплин факультативного цикла основной образовательной программы магистратуры.

«Современные энергетические технологии» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

В базовой части базового цикла:

- Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике.

В вариативной части:

- Перспективные направления и энергосбережение в теплотехнологиях;
- Проектирование и эксплуатация теплоэнергетических установок.

В блоке дисциплин по выбору:

- Перспективные направления развития энергетики;
- Использование вторичных энергоресурсов в промышленности.

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
ОПК-1	способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> • цели и задачи исследования; • способы выбора и создания критериев оценки <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • формулировать цели и задачи исследования; • выявлять приоритеты решения задач; • выбирать и создавать критерии оценки <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Методами выбора и создания критериев оценки
ОПК-2	способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Основные методы модернизации технологического оборудования <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования и систем; • Выполнять проектные расчеты <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Методами улучшения эксплуатационных характеристик

		энергетического оборудования и систем, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов
--	--	--

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет:

для очной формы: аудиторных занятий – 24 часа;

для очно-заочной формы: аудиторных занятий – 18 часов.

Структура и содержание дисциплины «Современные энергетические технологии» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

Содержание разделов дисциплины

Тема 1. Введение. Развитие турбостроения для АЭС в свете государственной стратегии развития атомной энергетики в первой половине XXI века

Основные направления технического перевооружения атомных электростанций. Перспективы развития атомной энергетики. Проблема повышения мощности энергоблоков и пути ее решения в России и за рубежом. Совершенствование турбин АЭС производства ЛМЗ. Особенности их проектирования. Выбор начального давления. Внешняя сепарация влаги и промежуточный перегрев. Тихоходные и быстроходные турбины, их сравнение.

Продление срока службы паротурбинным установкам АЭС, выработавшим свой ресурс. Физическое и моральное старение оборудования и его последствия. Контроль состояния металла на электростанциях. Восстановительная термическая обработка паропроводов, роторов и корпусов турбин.

Тема 2. Влияние влажности пара на экономичность и надежность турбин

Расчеты потерь энергии от влажности, методы повышения эффективности влажнопаровых турбинных ступеней. Способы влагоудаления, применяемые для снижения влажности в проточной части. Эрозионный износ деталей проточной части турбины и способы снижения этого износа.

Тема 3. Пути повышения единичной мощности, экономичности и надежности паротурбинных установок на сверхкритические параметры пара

Применение новых технологий при техническом перевооружении угольных и газомазутных ТЭС. Новые технологии по экологически чистому сжиганию углей. Сжигание топлива в циркулирующем кипящем слое. Усовершенствование конденсационных паротурбинных установок.

Тема 4. Проблемы создания паротурбинных установок на суперсверхкритические параметры пара

Основные технические проблемы повышения начальных параметров пара. Зарубежные энергоблоки нового поколения. Проблемы перехода угольной энергетики России на суперсверхкритические параметры пара. Технические требования к котлам и паровым турбинам на суперсверхкритические параметры пара.

Тема 5. Турбины для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии

Турбины с противодавлением. Диаграмма режимов для этих турбин. Требования, предъявляемые к теплофикационным турбинам с регулируемым отбором пара, основные особенности проектирования таких турбин. Диаграмма режимов турбин с одним регулируемым отбором пара. Турбины с двумя регулируемым отборами пара. Диаграмма режимов этих турбин. Турбины с отопительными отборами пара. Диаграмма режимов.

Тема 6. Расчет и проектирование стопорных и регулирующих клапанов

Требования, предъявляемые к клапанам. Типы клапанов, их конструкции и допустимая скорость течения в клапанах. Процесс в $h-s$ диаграмме в клапанной системе. Потери энергии в клапанах, потери давления. Современные конструкции клапанов с разгрузкой.

Тема 7. Выходные патрубки мощных паровых турбин

Требования, предъявляемые к патрубкам. Диффузоры патрубков. Процесс восстановления давления в $h-s$ диаграмме. Характеристики эффективности диффузоров. Мероприятия, улучшающие эффективность диффузоров. Структура течения в сборной камере. Конструкции патрубков.

Тема 8. Последние ступени паровых турбин

Основные уравнения для $3-d$ расчета потока. Осесимметричный метод расчета турбинной ступени. Алгоритм расчета, программа расчета. Методы формирования пространственного течения в турбинной ступени большой верности. Потери в турбинной ступени большой верности. Особенности профилирования сопловых и рабочих лопаток. Двойковыпуклые профили МЭИ, профили периферийных сечений рабочих лопаток. Этапы проектирования последних ступеней паровых турбин.

Тема 9. Турбинные технологии для строительства электростанций небольшой мощности

Оптимизация тепловой схемы и развитие монарных ПГУ на базе строительства электростанций небольшой мощности. Технологический процесс получения электроэнергии на ГеоЭС. Тепловая схема и конструкция паротурбинных установок для геотермальных электрических станций.

5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Современные энергетические технологии» 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;
- обсуждение и защита рефератов по дисциплине;
- 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 источников и систем теплоснабжения, а также эффективных методов эксплуатации оборудования и объектов систем теплоснабжения и теплоснабжения.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определен главной целью образовательной программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием дисциплины «Современные энергетические технологии» и в целом по дисциплине составляет 50% аудиторных занятий. Занятия практического типа составляют 33% от объема аудиторных занятий.

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:

- подготовка и выступление на семинарском занятии с презентацией и обсуждением на тему «Современные технологии в теплоэнергетике» (индивидуально для каждого обучающегося);
- реферат (индивидуально для каждого обучающегося);
- тестирование, разбор ситуационных задач.

Практические занятия посвящены выполнению упрощенных расчетов по определению теплотехнологических параметров энергоустановок в объеме, предусматривающем реализацию теоретических и практических навыков, обучающихся по направлению.

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 семинарским занятиям.

Образцы тестовых заданий, контрольных вопросов и заданий для проведения текущего контроля, приведены в приложении 2.

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
ОПК-1	способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК-2	способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы

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).

ОПК-1 – способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки

Показатель	Критерии оценивания			
	Оценка «неудовлетворительно» (не зачтено) или отсутствие сформированности компетенции	Оценка «удовлетворительно» (зачтено) или низкой уровень освоения компетенции	Оценка «хорошо» (зачтено) или повышенный уровень освоения компетенции	Оценка «отлично» (зачтено) или высокий уровень освоения компетенции
знать: цели и задачи исследования; способы выбора и создания критериев оценки	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: цели и задачи исследования; способы выбора и создания критериев оценки	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: цели и задачи исследования; способы выбора и создания критериев оценки. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: цели и задачи исследования; способы выбора и создания критериев оценки, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: цели и задачи исследования; способы выбора и создания критериев оценки при действиях в нестандартных ситуациях, свободно оперирует приобретенными знаниями.
уметь: формулировать цели и задачи исследования; выявлять приоритеты решения задач; выбирать и создавать критерии оценки	Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет формулировать цели и задачи исследования; выявлять приоритеты решения задач; выбирать и создавать критерии оценки	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: формулировать цели и задачи исследования; выявлять приоритеты решения задач; выбирать и создавать критерии оценки. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей,	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: формулировать цели и задачи исследования; выявлять приоритеты решения задач; выбирать и создавать критерии	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: формулировать цели и задачи исследования; выявлять приоритеты решения задач; выбирать и создавать критерии оценки. Свободно оперирует

		обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	оценки. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.
владеть: методами выбора и создания критериев оценки	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами выбора и создания критериев оценки	Обучающийся владеет методами выбора и создания критериев оценки в неполном объеме, допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях.	Обучающийся частично владеет методами выбора и создания критериев оценки при действиях в нестандартных ситуациях, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся в полном объеме владеет методами выбора и создания критериев оценки при действиях в нестандартных ситуациях, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.
ОПК-2 – способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы				
знать: Основные методы модернизационного технологического оборудования	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: Основные методы модернизационного технологического	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: Основные методы модернизационного	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: Основные методы модернизационного	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: Основные методы модернизационного технологического оборудования, свободно оперирует

	оборудования	технологического оборудования. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.	технологического оборудования, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.	приобретенными знаниями.
уметь: Формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования и систем, выполнять проектные расчеты	Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования и систем, выполнять проектные расчеты	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования и систем, выполнять проектные расчеты. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования и систем, выполнять проектные расчеты. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования и систем, выполнять проектные расчеты. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.

		умениями при их переносе на новые ситуации.	ситуации.	
владеть: Методами улучшения эксплуатационных характеристик энергетического оборудования и систем, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами улучшения эксплуатационных характеристик энергетического оборудования и систем, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов	Обучающийся владеет методами улучшения эксплуатационных характеристик энергетического оборудования и систем, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов в неполном объеме, допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях.	Обучающийся частично владеет методами улучшения эксплуатационных характеристик энергетического оборудования и систем, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся в полном объеме владеет методами улучшения эксплуатационных характеристик энергетического оборудования и систем, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.

Шкалы оценивания результатов промежуточной аттестации и их описание:

Форма промежуточной аттестации: зачет.

Промежуточная аттестация обучающихся в форме зачёта 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 «зачтено» или «не зачтено».

Шкала оценивания	Описание
Зачтено	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.
Не зачтено	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. Афанасьев В.Н. Интенсификация теплоотдачи при вынужденной конвекции: Метод. указания к курсовой научно-исследовательской работе по курсу «Методы интенсификации теплообмена» [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / В.Н. Афанасьев, В.Л. Трифонов. — Электрон. дан. — Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 68 с.

2. Крылов Ю.А. Энергосбережение и автоматизация производства в теплоэнергетическом хозяйстве города. Частотно-регулируемый электропривод [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.А. Крылов, А.С. Карандаев, В.Н. Медведев. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2013. — 176 с.

3. Освоение низкопотенциального геотермального тепла [Электронный ресурс]: монография — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2012. — 280 с.

4. Гудилин Н.С. Гидравлика и гидропривод [Электронный ресурс]: — Электрон. дан. — М.: Горная книга, 2007. — 520 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=3442

5. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии [Электронный ресурс]: монография — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2008. — 376 с.

б) дополнительная литература:

1. Гойдо М.Е. Проектирование объемных гидроприводов [Электронный ресурс]: — Электрон. дан. — М. : Машиностроение, 2009. — 304 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=729

2. Острейковский В.А. Безопасность атомных станций [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.А. Острейковский, Ю.В. Швыряев. — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2008. — 352 с.

3. Быков В.В. Исследовательское проектирование в машиностроении [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / В.В. Быков, В.П. Быков. — Электрон. дан. — М.: Машиностроение, 2011. — 256 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=3312

4. Родионов В.Г. Энергетика: Проблемы настоящего и возможности будущего [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — Москва: ЭНАС, 2010. — 352 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»).

Фильм: <https://www.youtube.com/watch?v=IjTFFI4xTQE>.

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» Ауд. АВ2415, 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

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 «Современные энергетические технологии» имеет своей целью ознакомить студентов с достижениями в области современных энергетических технологий, добиться уяснения ими эффективных методов проектирования, моделирования и эксплуатации энергооборудования и энергосистем, порядка их применения, привить им практические навыки использования этих знаний к конкретным производственным 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 Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и профилю «Распределенная тепловая энергетика».

Автор

Доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»

к.т.н., доцент

В.С. Тимохин

Программа обсуждена на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика». Протокол от 30 августа 2021 г. № 1

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»

к.т.н., доцент

Л.А. Марюшин

Руководитель ООП

В.С. Тимохин

**Структура и содержание дисциплины «Современные энергетические технологии»
по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

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	
Тема 1	Лекция. Введение. Развитие турбостроения для АЭС в свете государственной стратегии развития атомной энергетики в первой половине XXI века	2	1	1												
	Семинарское занятие. Выдача задания на реферат				1											
Тема 2	Лекция. Влияние влажности пара на экономичность и надежность турбин	2	2	1												
	Семинарское занятие				1											
Тема 3	Лекция. Пути повышения единичной мощности, экономичности и надежности паротурбинных установок на сверхкритические параметры пара	2	3	1												
	Семинарское занятие				1											
Тема 4	Лекция. Проблемы создания паротурбинных установок на суперсверхкритические параметры пара	2	4	1												
	Семинарское занятие				1							+				
Тема 5	Лекция. Турбины для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии	2	5	1												
	Семинарское занятие				1											
Тема 6	Лекция. Расчет и проектирование стопорных и регулирующих клапанов	2	6	1												
	Семинарское занятие.				1							+				
Тема 7	Лекция. Выходные патрубки мощных паровых турбин	2	7	1												
	Семинарское занятие.				1											
Тема 8	Лекция. Последние ступени паровых турбин	2	8	1												
	Семинарское занятие.				1											
Тема 9	Лекция. Турбинные технологии для строительства электростанций небольшой мощности	2	9	1												
	Семинарское занятие. Сдача реферата				1											
Форма аттестации		2														
Всего часов по дисциплине в первом семестре																

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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, очно-заочная

Кафедра: «Промышленная теплоэнергетика»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Современные энергетические технологии»

Москва
2021

Таблица 1
к приложению 2

Паспорт фонда оценочных средств

Современные энергетические технологии					
ФГОС ВО 13.04.01 Теплотехника и теплоэнергетика					
КОМПЕТЕНЦИИ		Перечень компонентов	Технология формирования	Форма оценочного средства	Степени уровней освоения компетенций
ИНДЕКС	ФОРМУЛИРОВКА				
ОПК-1	способностью формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки	Знать: цели и задачи исследования; способы выбора и создания критериев оценки	Лекция, семинарские занятия, решение ситуационных задач, СРС	Зачет, реферат, контрольный опрос	<p>Базовый уровень: способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки.</p> <p>Повышенный уровень: способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом</p>
ОПК-2	способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	Знать: основные методы монтажа и модернизации технологического оборудования	Лекция, семинарские занятия, решение ситуационных задач, СРС	Зачет, тестирование, контрольный опрос	<p>Базовый уровень: способен формулировать задания на разработку проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования, мероприятиями по улучшению эксплуатационных характеристик, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов.</p> <p>Повышенный уровень: способен формулировать задания на разработку нестандартных проектных решений, связанных с модернизацией технологического оборудования в сложных условиях, мероприятиями по улучшению эксплуатационных характеристик, повышению экологической безопасности, экономии ресурсов 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. Решение задач расчета элементов тепловой схемы и схемы в целом для турбинной установки;
2. Расчет числа степеней и выбор основных размеров проточной части;
3. Изучение конструкции основных узлов паровой турбины;
4. Решение задач по расчету дополнительных потерь энергии от парциальности, трения, от утечек, от влажности;
5. Оценка механических напряжений в рабочих лопатках;
6. Решение задач оптимизации размеров и характеристик турбинных ступеней;
7. Расчет распределения параметров по высоте лопаток ступеней большой верности при различных законах закрутки;
8. Расчет осевых усилий, действующих на ротор.

Темы рефератов по дисциплине

1. Пути повышения экономичности энергоблоков с ПТУ.
2. Совершенствование паровых турбин.
3. Переход к суперсверхкритическим параметрам пара (ССКП).
4. Совершенствование тепловой схемы паротурбинных установок.
5. Требования к материалам для различных энергетических установок и их элементов.
6. Проблемы достижения заданных параметров при эксплуатации энергоустановок.
7. Основные способы и направления создания новых материалов.
8. Уровень развития нетрадиционной энергетики.
9. Наиболее перспективные методы получения электрической энергии в России.
10. Проблемы развития нетрадиционной энергетики.
11. Запуск гидроприводов и пневмоприводов в эксплуатацию в энергетике.
12. Устройства для обслуживания гидроприводов и пневмоприводов.
13. Перспективы развития гидропневмоприводов в энергетике.
14. Гидравлическое оборудование энергетических установок.
15. Назначение и классификация гидравлических систем.
16. Методика статического расчета гидравлического привода.
17. Динамические характеристики гидроприводов энергетических установок.
18. Назначение и классификация пневматических систем.
19. Динамические характеристики пневмосистем энергетических установок.
20. Понятие надежности в энергетических установках.
21. Прочность, износ, коррозия.
22. Срок службы и расчетный ресурс работы оборудования.
23. Способы обеспечения заданного уровня надежности.
24. Техническое диагностирование оборудования гидропневмосистем.
25. Общие тенденции развития технического диагностирования энергооборудования.

Вопросы для зачета

1. Основные направления технического перевооружения атомных электростанций.
2. Перспективы развития атомной энергетики.
3. Проблема повышения мощности энергоблоков и пути ее решения в России и за рубежом.
4. Совершенствование турбин АЭС производства ЛМЗ. Особенности их проектирования.
5. Выбор начального давления турбин.
6. Внешняя сепарация влаги и промежуточный перегрев в турбинах.
7. Тихоходные и быстроходные турбины, их сравнение.
8. Продление срока службы паротурбинным установкам АЭС, выработавшим свой ресурс.
9. Физическое и моральное старение оборудования и его последствия.
10. Контроль состояния металла на электростанциях.
11. Восстановительная термическая обработка паропроводов, роторов и корпусов турбин.
12. Расчеты потерь энергии от влажности, методы повышения эффективности влажнопаровых турбинных ступеней.
13. Способы влагоудаления, применяемые для снижения влажности в проточной части.
14. Эрозионный износ деталей проточной части турбины и способы снижения этого износа.
15. Применение новых технологий при техническом перевооружении угольных и газомазутных ТЭС.
16. Новые технологии по экологически чистому сжиганию углей.
17. Сжигание топлива в циркулирующем кипящем слое.
18. Усовершенствование конденсационных паротурбинных установок.
19. Основные технические проблемы повышения начальных параметров пара.
20. Зарубежные энергоблоки нового поколения.
21. Проблемы перехода угольной энергетики России на суперсверхкритические параметры пара.
22. Технические требования к котлам и паровым турбинам на суперсверхкритические параметры пара.
23. Турбины с противодавлением. Диаграмма режимов для этих турбин.
24. Требования, предъявляемые к теплофикационным турбинам с регулируемыми отборами пара, основные особенности проектирования таких турбин.
25. Диаграмма режимов турбин с одним регулируемым отбором пара.
26. Турбины с двумя регулируемыми отборами пара. Диаграмма режимов этих турбин.

27. Турбины с отопительными отборами пара.
28. Диаграмма режимов турбин.
29. Требования, предъявляемые к клапанам.
30. Типы клапанов, их конструкции и допустимая скорость течения в клапанах.
31. Процесс в $h-s$ диаграмме в клапанной системе.
32. Потери энергии в клапанах, потери давления.
33. Современные конструкции клапанов с разгрузкой.
34. Требования, предъявляемые к патрубкам.
35. Диффузоры патрубков турбин.
36. Процесс восстановления давления в $h-s$ диаграмме.
37. Характеристики эффективности диффузоров.
38. Мероприятия, улучшающие эффективность диффузоров.
39. Структура течения в сборной камере.
40. Конструкции патрубков.
41. Основные уравнения для 3-d расчета потока.
42. Осесимметричный метод расчета турбинной ступени. Алгоритм расчета, программа расчета.
43. Методы формирования пространственного течения в турбинной ступени большой верности.
44. Потери в турбинной ступени большой верности.
45. Особенности профилирования сопловых и рабочих лопаток.
46. Двояковыпуклые профили МЭИ, профили периферийных сечений рабочих лопаток.
47. Этапы проектирования последних ступеней паровых турбин.
48. Оптимизация тепловой схемы и развитие монарных ПГУ на базе строительства электростанций небольшой мощности.
49. Технологический процесс получения электроэнергии на ГеоЭС.
50. Тепловая схема и конструкция паротурбинных установок для геотермальных электрических станций.

Примеры задач для семинарских занятий

Задача 1. Расчет направляющих лопаток 1-ой ступени

Произведем расчет проточной части конденсационной паровой турбины типа К-30-4,2.

1. Средний диаметр $d_1=1,1$ м.
2. Тепловой перепад $h_{i1}=69,474$ кДж/кг.
3. Характеристический коэффициент $x=0,476$.
4. Частота вращения $n_c=50$ с⁻¹.
5. Окружная скорость:

$$u=\pi d_1 n =3,14 \cdot 1,1 \cdot 50=172,788 \text{ м/с.}$$

6. Расход пара через ступень:

$$G_1=G_{(i-1)}-\Delta G_y-G_{отб}=28,727-0,575-0=28,152 \text{ кг/с.}$$

7. Давление пара $P_{0i}=1,754$ МПа.
8. Удельный объем пара перед ступенью $V_{0i}=0,178$ м³/кг.
9. Энтальпия пара перед ступенью $i_{0i}=3081,980$ кДж/кг.
10. Выходная кинетическая энергия пара, покидающего предыдущую

ступень, $\Delta h_{c2(i-1)}=5,64$ кДж/кг.

11. Коэффициент использования выходной кинетической энергии из предыдущей ступени $\mu_i=0$.

12. Доля кинетической энергии, используемая в ступени:

$$\mu_i \Delta h_{c2(i-1)}=0 \cdot 5,64=0 \text{ кДж/кг.}$$

13. Полные параметры пара перед ступенью:

а) энтальпия

$$i_0^*=i_0+\mu \Delta h_{c2(i-1)}=3081,980+0=3081,980 \text{ кДж/кг;}$$

б) давление p_0^* (по is – диаграмме) $p_0^*=1,754$ МПа;

в) удельный объем $V_0^*=0,178$ м³/кг.

14. Полный изоэнтропийный перепад энтальпий:

$$h_0=h_{0(i)}+\mu_i \Delta h_{c2(i-1)}=69,747+0=69,747 \text{ кДж/кг.}$$

15. Параметры пара за ступенью при изоэнтропийном расширении:

а) давление p_2 (по h_0 в is – диаграмме) $p_2=1,396$ МПа;

б) удельный объем V'_{2t} (по h_0 в is – диаграмме) $V'_{2t}=0,212$ м³/кг.

16. Высота направляющей лопатки (предварительное значение):

$$l_{(i)} \approx l_{1(i-1)} \\ G_1 V_{2t(i)}=0,026 \text{ м.}$$

17. Степень реактивности у корня ступени $\rho'=0,02$.

18. Степень реактивности на средней окружности:

$$\rho=1-(1-\rho')(1-l_1/d_1)^2=1-(1-0,02)(1-0,026/1,1)^2=0,066.$$

19. Тепловой перепад в направляющем аппарате:

$$h_1^*=(1-\rho)h_0=(1-0,066) \cdot 69,474=64,904 \text{ кДж/кг.}$$

20. Параметры за направляющим аппаратом:

а) энтальпия:

$$i_{1t}=i_0-h_1^*=3081,980-64,904=3017,076 \text{ кДж/кг;}$$

б) давление:

$$p_1 = p_0^* (1 - (m \cdot h_1^*) / (p_0^* \cdot V_0^*))^{1/M} = 1,754 \cdot (1 - 0,231 \cdot 64,904) / (1,754 \cdot 0,178)^{1/0,231} = 1,417 \text{ МПа};$$

в) удельный объем:

$$V_{1t} = V_0^* (p_0^* / p_1)^{1/k} = 0,178 \cdot (1,754 / 1,417)^{1/1,3} = 0,210 \text{ м}^3/\text{кг};$$

г) сухость пара $x_{1t} = 1$.

21. Абсолютная теоретическая скорость пара при истечении из направляющего аппарата:

$$C_{1t} = \sqrt{2 \cdot h_1^* \cdot 10^3} = \sqrt{2 \cdot 64,904 \cdot 10^3} = 360,289 \text{ м/с}.$$

22. Показатель в уравнении изоэнтропы $k = 1,3$ – для сухого пара, или $k = 1,035 + 0,1x$ – для влажного пара:

$$m = (k-1)/k = (1,3-1)/1,3 = 0,231.$$

23. Скорость звука на выходе из направляющего аппарата:

$$a_1 = \sqrt{k \cdot p_1 \cdot V_{1t}} = \sqrt{1,3 \cdot 1,417 \cdot 10^6 \cdot 0,210} = 621,614 \text{ м/с}.$$

24. Число Маха:

$$M = C_{1t} / a_1 = 360,289 / 621,614 = 0,580.$$

25. Отношение давлений:

$$\Pi = p_1 / p_0^* = 1,417 / 1,754 = 0,808.$$

26. Эффективный угол выхода из направляющего аппарата (принимаем) $\alpha_1 = 11$ град.

27. Хорда профиля направляющей лопатки:

$$b_1 = V_1 / \sin \alpha_y = 0,05 / \sin 34,5^\circ = 0,088 \text{ м (принимается по прототипу)}.$$

28. Отношение $b_1 / l_1 = 0,088 / 0,025 = 3,393$.

29. Коэффициент скорости φ (или коэффициент потерь ζ_1) (по опытным данным) $\varphi = 0,932$.

30. Абсолютная действительная скорость пара при истечении из направляющего аппарата:

$$C_1 = \varphi \cdot C_{1t} = 0,932 \cdot 360,289 = 335,789 \text{ м/с}.$$

31. Потеря энергии в направляющей решетке:

$$\Delta h_1 = (1 - \varphi^2) h_1^* = \zeta_1 h_1^* = 1 - 0,932^2 \cdot 64,904 = 8,527 \text{ кДж/кг}.$$

32. Параметры пара за направляющим аппаратом:

а) энтальпия:

$$i_1 = i_{1t} + \Delta h_1 = 3017,076 + 8,527 = 3025,603 \text{ кДж/кг};$$

б) удельный объем:

$$V_1 = 0,211 \text{ м}^3/\text{кг} \text{ (по } p_1 \text{ и } i_1 \text{ в } i\text{-s - диаграмме)}.$$

33. Критическое отношение:

$$\Pi_{кр1} = (2 / (k+1))^{k / (k-1)} = (2 / (1,3+1))^{1,3 / (1,3-1)} = 0,5457.$$

34. Параметры пара в критическом сечении направляющего аппарата:

а) давление $P_{кр1} = \Pi_{кр1} P_0^*$;

б) удельный объем:

$$v_{кр1} = v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_{кр1}} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Не определяем, так как $\Pi_1 > \Pi_{кр1}$.

35. Скорость пара в критическом сечении $C_{1кр} = \sqrt{k P_{кр1} V_{кр1}}$ не вычисляем,

так как $P_1 > P_{кр1}$.

36. Угол выхода пара из направляющего аппарата с учетом отклонения потока в косом срезе сопла $\alpha_1^* = \arcsin(\sin \alpha_1 C_{кр} V_{1t} / C_{1t} V_{кр1})$ не вычисляем, так как сечение не критическое.

37. Угол выхода пара из направляющего аппарата с учетом отклонения потока в косом срезе сопла $\delta_{1к.с.} = \alpha_1^* - \alpha_1 \leq 4 \dots 5^\circ$.

38. Параметры диафрагменных уплотнений (принимаются):

а) диаметр $d_y = 0,34$ м;

б) зазор $\delta_y = 0,0005$ м;

в) число гребней $z_y = 8$ шт.;

г) коэффициент расхода $\mu_y = 0,68$;

д) поправочный коэффициент $k_y = 1,35$;

39. Расход пара через диафрагменное уплотнение:

$$\Delta G_y = \mu_y k_y \pi d_y \delta_y \sqrt{P_0 / V_0} \sqrt{(1 - (P_1 / P_0)^2)} / z_y = 0,68 \cdot 1,35 \cdot \pi \cdot 0,34 \cdot 0,0005 \cdot \sqrt{1,754 \cdot 10^6 / 0,178} \sqrt{(1 - (1,417 / 1,854)^2)} / 8 = 0,320 \text{ кг/с.}$$

40. Расход пара через направляющую решетку:

$$G_1 = G_i - \Delta G_y = 28,152 - 0,320 = 27,832 \text{ кг/с.}$$

41. Коэффициент расхода направляющей решетки μ_1 (по опытным данным):

$$\mu_1 = 0,985 - 0,0058 \cdot b_1 / l_1 = 0,985 - 0,0058 \cdot 3,393 = 0,965.$$

42. Поправочный коэффициент $k_\mu = \mu^{(вл)} / \mu^{(пл)} = 1$ (по опытным данным).

43. Площадь проходных сечений направляющей решетки при $P > P_{кр}$:

$$f_1 = G_1 V_{1t} / \mu_1 C_{1t} k_\mu = 27,832 \cdot 0,210 / 0,965 \cdot 360,289 \cdot 1 = 0,01678 \text{ м}^2.$$

44. Площадь проходных сечений направляющей решетки при $P \leq P_{кр}$ – $f_1 = G_1 V_{кр1} / \mu_1 C_{кр1} k_\mu$ не вычисляем, так как сечение не критическое.

45. Произведение:

$$\varepsilon l_1 = f_1 / \pi d_1 \sin \alpha_1 = 0,01678 / \pi \cdot 1,1 \cdot \sin 11^\circ = 0,025 \text{ м.}$$

46. Степень порциальности $\varepsilon = 1$.

47. Высота направляющей лопатки:

$$l_1 = (\varepsilon l_1) / \varepsilon = (0,025 \cdot 10^3) / 1 = 25 \text{ мм.}$$

48. Диаметр корневого обвода:

$$d_1' = d_1 - l_1 = 1,1 - 0,025 = 1,075 \text{ м.}$$

49. Относительный шаг направляющей решетки $\bar{t}_1 = 0,807$ (по опытным данным).

50. Шаг направляющей решетки:

$$t = \bar{t}_1 b_1 = 0,807 \cdot 0,088 = 0,0712 \text{ м.}$$

51. Число направляющих лопаток:

$$z_1 = \pi d_1 \varepsilon / t = \pi \cdot 1,1 \cdot 1 / 0,0712 = 49 \text{ шт.}$$

Задача 2. Тепловой процесс в i,s -диаграмме промежуточной нерегулируемой ступени турбины КС-Б (№113).

Номинальная мощность турбины	$N_{\text{НОМ}} = 30,000 \text{ МВт}$
Начальное давление пара	$p_0 = 4,200 \text{ МПа}$
Начальная температура пара	$T_0 = 720,000 \text{ К}$
Конечное давление пара	$p_k = 3,300 \text{ кПа}$
Температура питательной воды	$T_{\text{ПВ}} = 433,000 \text{ К}$

Данные из расчёта тепловой схемы ПТУ:

Начальная энтальпия пара	$i_0 = 3320,580 \text{ кДж/кг}$
Изоэнтروпийный перепад энтальпий в турбине	$H_0 = 1263,630 \text{ кДж/кг}$
Расходы пара: - подводимого к турбине - отбираемого на П1 - отбираемого на П2 - отбираемого на П3 - отбираемого на П4 - отводимого в конденсатор	$G_0 = 28,727 \text{ кг/с}$ $G_1 = 1,351 \text{ кг/с}$ $G_2 = 1,597 \text{ кг/с}$ $G_3 = 1,691 \text{ кг/с}$ $G_4 = 1,676 \text{ кг/с}$ $G_k = 22,412 \text{ кг/с}$
Давление пара: - отбираемого на П1 - отбираемого на П2 - отбираемого на П3 - отбираемого на П4 - за последней ступенью турбины	$p_1 = 0,035 \text{ МПа}$ $p_2 = 0,117 \text{ МПа}$ $p_3 = 0,345 \text{ МПа}$ $p_4 = 0,771 \text{ МПа}$ $p_k = 3,498 \text{ кПа}$
Удельные расходы: - пара - тепла - топлива	$d = 3,899 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ $q = 2458,980 \text{ ккал/кВт}\cdot\text{ч}$ $b = 0,351 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$
Относительный внутренний к.п.д. турбины	$\eta_{oi} = 0,856.$

Тепловой процесс строим для шестой нерегулируемой ступени.

1. Энтальпия пара перед ступенью $i_0 = 2807,118 \text{ кДж/кг}$;
 $i_0^* = i_0 + \mu \cdot \Delta h_{c2(i-1)} = 2807,118 + 0,94 \cdot 1,770 = 2808,782 \text{ кДж/кг}.$

2. Полный изоэнтропийный перепад энтальпий:
 $h_0 = h_{0i} + \mu_i \cdot \Delta h_{c2} = 66,430 + 0,94 \cdot 1,770 = 68,094 \text{ кДж/кг}.$

3. Перепад в направляющем аппарате:
 $h_1^* = (1 - \rho) \cdot h_0 = (1 - 0,127) \cdot 68,094 = 59,472 \text{ кДж/кг}.$

4. Энтальпия пара за направляющим аппаратом при изоэнтропийном расширении:

$$i_{1t} = i_0^* - h_1^* = 2808,782 - 59,472 = 2749,310 \text{ кДж/кг}.$$

5. Потеря энергии в направляющем аппарате:
 $\Delta h_1 = (1 - \phi^2) \cdot h_1^* = (1 - 0,955^2) \cdot 59,472 = 5,231 \text{ кДж/кг}.$

6. Энтальпия пара за направляющим аппаратом с учётом потерь:

$$i_1 = i_{1t} + \Delta h_1 = 2749,310 + 5,231 = 2754,541 \text{ кДж/кг.}$$

7. Энтальпия пара в относительном движении перед рабочим колесом:

$$i_{1W}^* = i_1 + \frac{W_1^2}{2} = 2754,541 + \frac{156,334^2}{2} = 2766,761 \text{ кДж/кг.}$$

8. Теплоперепад, срабатываемый в рабочем колесе, без учета потерь:

$$h_2 = \rho \cdot h_0 = 0,127 \cdot 68,094 = 8,622 \text{ кДж/кг.}$$

9. Энтальпия пара за рабочим колесом при изоэнтропийном расширении:

$$i_{2t} = i_1 - h_2 = 2754,541 - 8,622 = 2745,919 \text{ кДж/кг.}$$

10. Потери энергии в рабочем колесе:

$$\Delta h_2 = \frac{(1-\psi^2) \cdot W_{2t}^2}{2} = \frac{(1-0,940^2) \cdot 204,167^2}{2} = 2,430 \text{ кДж/кг.}$$

11. Энтальпия пара за рабочим колесом с учетом потерь:

$$i_2 = i_{2t} + \Delta h_2 = 2745,919 + 2,430 = 2748,348 \text{ кДж/кг.}$$

12. Сумма дополнительных потерь энергии $\sum h_{\text{доп}} = 3,019 \text{ кДж/кг.}$

13. Выходная кинетическая энергия потока, покидающего ступень:

$$\Delta h_{C_2} = \frac{C_2^2}{2} = \frac{60,605^2}{2} = 1,836 \text{ кДж/кг.}$$

14. Потеря энергии с выходной скоростью:

$$\Delta h_{C_2} \cdot (1 - \mu) = 1,836 \cdot (1 - 0) = 1,836 \text{ кДж/кг.}$$

Внутренний перепад энтальпий в ступени:

$$h_i = i_0^* - i_2 - \sum \Delta h_{\text{доп}} - \Delta h_{C_2} = 2808,782 - 2748,348 - 3,019 - 1,836 = 55,579 \text{ кДж/кг.}$$

По результатам расчета строим тепловой процесс в i, s – диаграмме (рис. 1).

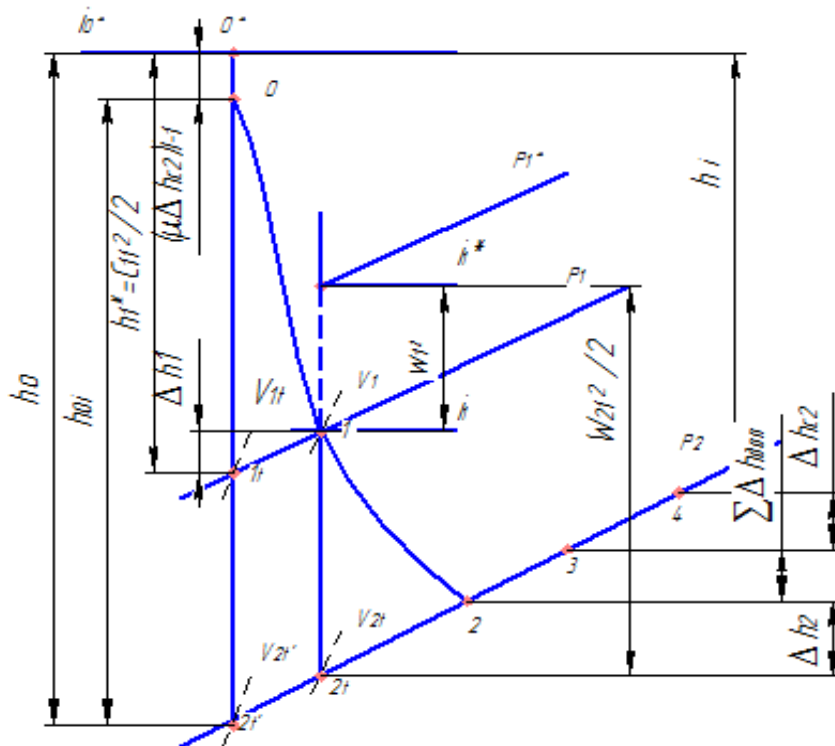


Рис. 1. Тепловой процесс турбинной ступени давления в i - s диаграмме

Задача 3. Расчет осевого усилия, действующего на ротор турбины

Исходные данные:

Средний диаметр на выходе рабочей решетки $d_2=1,254$ м.

Длина рабочей лопатки $l_2=0,126$ м.

Осевой открытый зазор у корня $\delta_1'=0,0030$ м.

Диаметр разгрузочного отверстия $d_{p.o.}=0,040$ м.

Число разгрузочных отверстий $z_{p.o.}=7$ шт.

Диаметр окружности расположения разгрузочных отверстий $D_{p.o.}=0,7$ м.

Диаметр диафрагменных уплотнения $d_y=0,46$ м.

Радиальный зазор диафрагменного уплотнения $\delta_y=0,0005$ м.

Число гребней диафрагменного уплотнения $z_y=2$.

Радиус скругления разгрузочных отверстий $r_{p.o.}=0,009$ м.

Параметры пара:

$p_0^*=0,2003$ МПа – давление пара перед ступенью;

$P_0=0,2003$ – статическое давление пара перед ступенью; давление за направляющим аппаратом $P_1=0,1567$ МПа;

удельный объем пара перед ступенью $V_0=0,989$ м³/кг;

давление за рабочим колесом $P_2=0,1369$ МПа.

Вычислим давление за направляющим аппаратом у корня:

$$p_1' = p_2 + \rho_1' \cdot (p_0^* - p_2) = 0,1369 + 0,02 \cdot (0,2003 - 0,1369) = 0,1382 \text{ МПа}$$

Решение:

1. Площадь проходного сечения диафрагменного уплотнения:

$$f_1 = \pi d_y \delta_y = \pi \cdot 0,46 \cdot 0,0005 = 0,0007226 \text{ м}^2.$$

2. Площадь проходного сечения разгрузочных отверстий:

$$f_{p.o.} = z_{p.o.} \pi d_{p.o.}^2 / 4 = 7 \cdot \pi \cdot 0,040^2 / 4 = 0,008796 \text{ м}^2.$$

3. Площадь проходного сечения корневого зазора:

$$f_{\delta'} = \pi d_1' \delta_1' = \pi \cdot (1,134) \cdot 0,003 = 0,0107 \text{ м}^2.$$

4. Коэффициент расхода диафрагменного уплотнения $\mu_y=0,688$ (по опытным данным табл. 6.7 [4]).

5. Окружная скорость разгрузочных отверстий:

$$U_{p.o.} = \pi D_{p.o.} n_c = \pi \cdot 0,7 \cdot 50 = 109,956 \text{ м/с.}$$

6. Условная изоэнтروпийная скорость пара в разгрузочных отверстиях:

$$C_{0p.o.} = \sqrt{2 \cdot V_0 (P_x - P_2)} = \sqrt{2 \cdot 0,989 (0,1382 - 0,1369) \cdot 10^6} = 50,101 \text{ м/с.}$$

В первом приближении $P_x = P_1' = 0,1382$ МПа.

7. Характеристическое отношение разгрузочных отверстий:

$$(U/C_0)_{p.o.} = 109,956 / 50,101 = 2,195.$$

8. Коэффициент расхода через разгрузочные отверстия $\mu_{p.o.}=0,30$ (по опытным данным [6, с. 363]).

9. Решаем уравнения для определения P_x :

$$y_1 = \frac{\mu_y f_y}{\sqrt{z_y}} \left(1 - \frac{x}{2}\right); y_2 = \mu_{p.o.} f_{p.o.} \sqrt{x} - \mu_{\delta_1'} f_{\delta_1'} \sqrt{\rho - x};$$

Определим y_1 и y_2 при нескольких значениях x и результаты заносим в табл. 2.

Таблица 2

x	0,0180	0,0190	0,0200
y ₁	0,3484	0,34818	0,3480
y ₂	0,2106	0,26235	0,3732

По результатам расчета построим графики зависимости $y_1=f(x)$ и $y_2=f(x)$.
При условии $y_1=y_2$, $x=0,019941=\rho_d$.

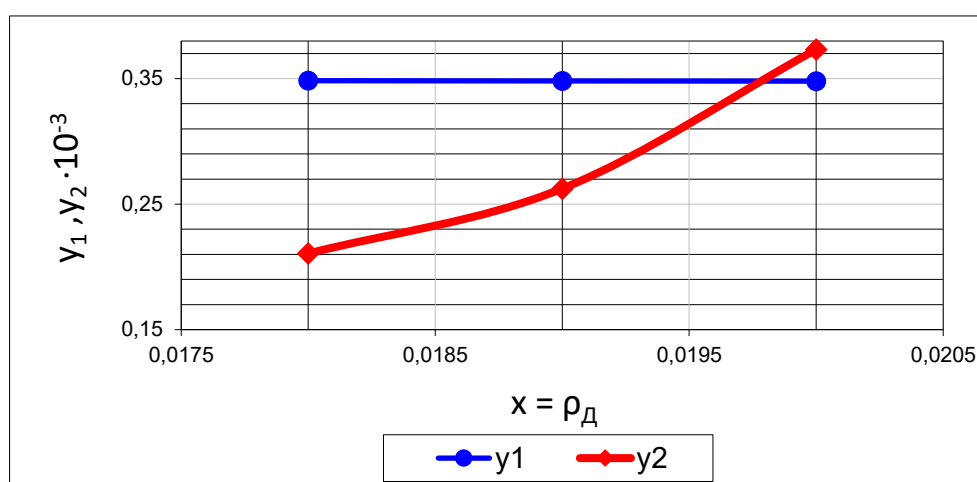
Определяем:

$$P_x = P_2 + x(P'_0 - P_2) = 0,1369 + 0,019941(0,2003 - 0,1369) = 0,1382 \text{ МПа.}$$

Уточняем:

$$C_{0p.o.} = \sqrt{2 \cdot V_0(P_x - P_2)} = \sqrt{2 \cdot 0,989 \cdot (0,1382 - 0,1369) \cdot 10^6} = 50,027 \text{ м/с};$$

$$(U/C_0)_{p.o.} = 109,956/50,027 = 2,198.$$

Рис. 2. График зависимости $y_1=f(x)$ и $y_2=f(x)$

Осевое усилие, действующее на полотно диска:

$$P_\delta = \frac{\pi}{4} \cdot ((d_2 - l_2)^2 - d_{y1}^2) \cdot (p_x - p_2) \cdot 10^6 - \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot z_0 \cdot (p_x - p_2) \cdot 10^6 =$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot ((1,254 - 0,126)^2 - 0,46^2) \cdot (0,1382 - 0,1369) - \frac{\pi}{4} \cdot 0,04^2 \cdot 7 \cdot (0,1382 - 0,1369) = 1043,150 \text{ Н}$$

Осевое усилие, действующее на венец рабочей лопатки:

$$P_{рл} = G(C_{1z} - C_{2z}) + (p_1 - p_2) \cdot \pi \cdot d_2 \cdot l_2 = 24,785 \cdot (331,053 \cdot \sin(11^\circ) - 63,551 \cdot \sin(86,428^\circ)) + (0,2003 - 0,1369) \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 1,254 \cdot 0,126 = 12644,640 \text{ Н.}$$

Осевое усилие, действующее на диафрагменное уплотнение:

$$P_{упл} = 0,5 \cdot \pi \cdot d_{y1} \cdot h_y \cdot (p_0 - p_x) =$$

$$= 0,5 \cdot \pi \cdot 0,46 \cdot 0,0005 \cdot (0,2003 - 0,1382) \cdot 10^6 = 22,436 \text{ Н.}$$

Осевое усилие, действующее на ротор:

$$P_{ос} = P_\delta + P_{рл} + P_{упл} = 1043,150 + 12644,640 + 22,436 = 13710,226 \text{ Н.}$$