

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

Дата подписания: 02.09.2023 16:18:14

«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Уникальный программный ключ:

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

УТВЕРЖДЕНО

Декан Факультета урбанистики и
городского хозяйства

К. И. Лушин

2022г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**«Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и
теплотехнике»**

Направление подготовки
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки
Распределенная тепловая энергетика

Квалификация (степень) выпускника
Магистр

Форма обучения
Очная и заочная

Москва
2022

1. Цели освоения дисциплины

К **основным целям** освоения дисциплины «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» следует отнести:

- формирование знаний о современных принципах, методах и средствах управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике, испытаний и контроля теплотехнологических параметров энергетических систем;

- выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать и решать задачи анализа режимов эксплуатации теплоэнергетических установок;

- 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 и средств управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике.

К **основным задачам** освоения дисциплины «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» следует отнести:

- выработать навыки у студентов самостоятельно формулировать задачи управления и контроля технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике;

- научить мыслить системно на примерах повышения энергетической эффективности энергетических установок с учетом технологических, экологических и экономических факторов;

- научить анализировать существующие системы и их элементы, разрабатывать и внедрять необходимые изменения в их структуре с позиций повышения эффективности и энергосбережения;

- дать информацию о новых направлениях в совершенствовании систем управления и контроля в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать преимущества и недостатки систем управления и контроля и их элементов, как отечественных, так и зарубежных;

- научить анализировать результаты моделирования, производить поиск оптимизационного решения для систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике.

2. Место дисциплины в структуре ООП магистратуры

Дисциплина «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» относится к числу профессиональных учебных дисциплин базовой части базового цикла основной образовательной программы магистратуры.

Дисциплина «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

- Перспективные направления и энергосбережение в теплотехнологиях;
- Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок;
- Проектирование и эксплуатация источников и систем теплоснабжения;
- Проектирование и эксплуатация систем отопления и вентиляции;
- Установки по производству сжатых и сжиженных газов;
- Проектирование теплообменных аппаратов;
- Проектирование и эксплуатация теплоэнергетических установок;
- Проблемы энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологии.

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
УК-1	способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и

		теплотехнологического оборудования
УК-2	способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	<p>знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Средства и оборудование автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях; <p>уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> • применять методы и средства автоматизации систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях; <p>владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Методами и средствами автоматизации, управления и контроля технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **3** зачетные единицы, т.е. **108** академических часа (из них 72 часов – самостоятельная работа студентов).

Разделы дисциплины «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» изучаются на первом курсе в **первом** семестре.

Структура и содержание дисциплины «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

Содержание разделов дисциплины

Первый семестр

Введение

Предмет, задачи и содержание дисциплины. Место систем управления и контроля технологическими процессами в структуре энергетического комплекса предприятия. Принципы эффективного использования тепловой энергии. Основные термины и определения.

Организация управления технологическими процессами на ТЭС

Понятие управления, цели управления, критерии качества управления, объекта управления, автоматической системы управления. Автоматическое регулирование. Классификация систем автоматического регулирования (АСР), элементы АСР. Организация управления технологическими процессами на ТЭС. Баланс мощностей в ЭС, основные ТЭП. Понятие объединенной ЭС (ОЭС), баланс мощностей в ОЭС, структура и задачи оптимального управления ОЭС, глобальная целевая функция. ЭС и ОЭС как

автоматизированные технологические и производственные комплексы (АТК и АПК).

Многоуровневые иерархические системы управления

Понятия и признаки многоуровневых иерархических систем (МИС), примеры МИС в энергетике. Иерархия математических моделей (МИС), стратификация, условия стратификации реальных систем, элементы математического описания МИС. Технологические множества и примеры их использования в задачах оптимального управления. Понятие и назначение дерева целей МИС, иерархия и последовательность принятия решений; лицо, принимающее решение, (ЛПР) и решающие элементы (ЭР), примеры. Трехслойная система принятия решений в МИС, назначение основных элементов. Организационная структура МИС, страта, слой и звено как составные элементы МИС.

Организация оперативно-диспетчерского управления (ОДУ) ТЭС

Организация оперативно-диспетчерского управления ТЭС, влияющие факторы. Обобщенный энергоблок как объект управления. Понятие функциональной группы и подгруппы (ФГ и ФПГ) технологического оборудования, состав ФГ по котлу, турбине и вспомогательному оборудованию, организация управления на основе ФГ. Комплекс технических средств автоматизации (КТСА) как составной элемент систем диспетчерского управления, основные элементы КТСА. Эргономика автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора энергоблока, основные понятия и определения. Алгоритмизация процедуры принятия решения по управлению, примеры. Основные показатели оперативной загруженности дежурного персонала энергоблоков. Формирование загрузки оператора в условиях эксплуатации на рабочем месте, понятие и определение оптимального коэффициента загруженности.

Реализация АСУ ТП энергоблоков

АСУ ТП энергоблока как система управления единым технологическим процессом, основные преимущества по сравнению с системами регулирования отдельных агрегатов. Состав информационных и управляющих функций АСУ ТП по энергоблоку и ТЭС в целом. Принципы автоматизированного управления:

- советчик оператора;
- супервизорное управление;
- централизованное управление на основе единого программно-технического комплекса (ПТК);
- распределенное управление.

Область применения, преимущества и недостатки. Концепции построения АСУ ТП энергоблоков и ТЭС: общая и частная; концептуальная модель АСУ ТП ТЭС; понятие и назначение ЛВС. Пример реализации АСУ ТП парогазовой установки: ПГУ как объект управления; состав агрегатов, основные режимы работы, информационные и управляющие функции АСУ ТП ПГУ, функциональная схема и ее основные элементы, техническая реализация на основе современного КТСА.

Автоматизация энергоблоков ТЭС

Энергоблок ТЭС как объект управления, режимы работы по топливу и нагрузке, понятие приемистости. Назначение и состав общецелочных автоматических систем регулирования частоты и мощности; принцип функционирования. Функциональная схема АСР мощности энергоблока с прямоточным котлом. Регулирование мощности группы параллельно работающих энергоблоков, преимущества группового управления по сравнению с индивидуальным. Назначение и функционирование локальных АСР энергоблока. Назначение и состав элементов устройств логического управления (УЛУ) вспомогательных установок энергоблока. Назначение классификации автоматических тепловых защит (ТЗ) оборудования энергоблоков. Состав и релейные эквиваленты основных логических элементов ТЗ, показатели и пути обеспечения надежности ТЗ. Логическая схема действия ТЗ моноблока. Понятие автоматического пуска энергоблока ТЭС, этапы пуска блока с барабанным котлом; АСР процессом пуска по температуре и давлению пара в барабане и за котлом, автоматическая система разворота и нагружения турбогенератора. Особенности и укрупненный алгоритм пуска энергоблока с прямоточным котлом.

5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» и реализация компетентностного 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;
- защита и индивидуальное обсуждение выполняемых этапов расчетного задания;
- обсуждение и защита рефератов по дисциплине;
- подготовка, представление и обсуждение презентаций на семинарских занятиях;
- 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 установок по производству сжатых и сжиженных газов, а также эффективных методов эксплуатации оборудования и объектов систем ректификации и воздухоразделения.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определен главной целью образовательной программы, особенностью контингента

обучающихся и содержанием дисциплины «**Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике**».

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
Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике	https://online.mospolytech.ru/local/crw/course.php?id=1066

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:

В первом семестре

- подготовка и выступление на семинарском занятии с презентацией и обсуждением на тему «Системы управления и контроля технологическими процессами энергоблока ТЭЦ (котельной)» (индивидуально для каждого обучающегося).

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
УК-1	способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК-2	способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла

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).

УК-1 - способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий				
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	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования

		<p>ческого оборудования. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.</p>	<p>еского и теплотехнологического оборудования, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.</p>	<p>оборудования, свободно оперирует приобретенным и знаниями.</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>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</p>	<p>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</p>	<p>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</p>	<p>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>

		показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	
владеть: методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	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.	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.	Обучающийся в полном объеме владеет методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.
УК-2 - способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла				
знать: Методы и средства автоматизирова	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих

<p>нных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях</p>	<p>следующих знаний: методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях</p>	<p>знаний: методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях . Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.</p>	<p>следующих знаний: методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях , но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.</p>	<p>знаний: методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях , свободно оперирует приобретенными знаниями.</p>
<p>уметь: проектировать и применять методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях</p>	<p>Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет проектировать и применять методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях</p>	<p>Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: проектировать и применять методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей,</p>	<p>Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: проектировать и применять методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях.</p>	<p>Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: проектировать и применять методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной</p>

		обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	сложности.
владеть: методами проектирования и применения средств автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами проектирования и применения средств автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях	Обучающийся владеет методами проектирования и применения средств автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях 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 проектирования и применения средств автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.	Обучающийся в полном объеме владеет методами проектирования и применения средств автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.

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 «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» (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. Газотурбинные энергетические установки. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Цанев С.В. [и др.]. — Электрон. дан. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 428 с.

2. Якубенко И.А. Технологические процессы производства тепловой и электрической энергии на АЭС: учебное пособие для вузов. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / И.А. Якубенко, М.Э. Пинчук. — Электрон. дан. — М.: НИЯУ МИФИ, 2013. — 288 с.

3. Родионов, В.Г. Энергетика: Проблемы настоящего и возможности будущего. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М.: ЭНАС, 2010. — 352 с.

4. Пикина Г.А. Идентификация объектов управления в теплоэнергетике. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Пикина Г.А., Щедркина Т.Е., Волгин В.В.. — Электрон. дан. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 224 с.

б) дополнительная литература:

1. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике [Электронный ресурс]. - М.: МЭИ, 2005. - 352 с.

2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Издательство МЭИ, 2007. - 400 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.](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

Марюшин Л.А., Чугаев Е.А. Методические указания по организации самостоятельной работы по дисциплине «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике». Направление подготовки: 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Распределенная тепловая энергетика». – М.: Изд-во Московского политеха, 2017. – 22 с.

10. Методические рекомендации для преподавателя

Преподавание дисциплины «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике» имеет своей целью ознакомить студентов с достижениями в области прикладной теплоэнергетики, добиться уяснения ими основных правил расчета, проектирования и эксплуатации систем управления технологическими процессами 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

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

А.В. Рязанцева

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 «Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике»

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	
	Первый семестр															
Тема 1	Введение. Предмет, задачи и содержание дисциплины. Место систем управления и контроля технологическими процессами в структуре энергетического комплекса предприятия. Принципы эффективного использования тепловой энергии. Основные термины и определения.	1	1	2			10									
	Семинарское занятие «Определение расхода энергоносителя на нужды предприятия»				2											
Тема 2	Организация управления технологическими процессами на ТЭС	1	2	2			15									
	Понятие управления, цели управления, критерии качества управления, объекта управления, автоматической системы управления. Автоматическое регулирование. Классификация систем автоматического регулирования (АСР), элементы АСР. Организация управления технологическими процессами на ТЭС. Баланс мощностей в ЭС, основные ТЭП. Понятие объединенной ЭС (ОЭС), баланс мощностей в ОЭС, структура и задачи оптимального управления ОЭС, глобальная целевая функция. ЭС и ОЭС как автоматизированные технологические и производственные комплексы (АТК и АПК).															
	Семинарское занятие «Расчет баланса мощностей ТЭС»															
Тема	Многоуровневые иерархические системы управления	1	3	2			15									

3	<p>Понятия и признаки многоуровневых иерархических систем (МИС), примеры МИС в энергетике. Иерархия математических моделей (МИС), стратификация, условия стратификации реальных систем, элементы математического описания МИС. Технологические множества и примеры их использования в задачах оптимального управления. Понятие и назначение дерева целей МИС, иерархия и последовательность принятия решений; лицо, принимающее решение, (ЛПР) и решающие элементы (ЭР), примеры. Трехслойная система принятия решений в МИС, назначение основных элементов. Организационная структура МИС, страта, слой и звено как составные элементы МИС.</p>																			
	Семинарское занятие «Математические модели управления техническими системами»			2																
Тема 4	<p>Организация оперативно-диспетчерского управления (ОДУ) ТЭС</p> <p>Организация оперативно-диспетчерского управления ТЭС, влияющие факторы. Обобщенный энергоблок как объект управления. Понятие функциональной группы и подгруппы (ФГ и ФПГ) технологического оборудования, состав ФГ по котлу, турбине и вспомогательному оборудованию, организация управления на основе ФГ. Комплекс технических средств автоматизации (КТСА) как составной элемент систем диспетчерского управления, основные элементы КТСА. Эргономика автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора энергоблока, основные понятия и определения. Алгоритмизация процедуры принятия решения по управлению, примеры. Основные показатели оперативной загрузки дежурного персонала энергоблоков. Формирование загрузки оператора в условиях эксплуатации на рабочем месте, понятие и определение оптимального коэффициента загрузки оператора.</p> <p>Семинарское занятие «Определение коэффициента загрузки оператора»</p>	1	4	3			15													
Тема	Реализация АСУ ТП энергоблоков	1	5	3			15													

5	АСУ ТП энергоблока как система управления единым технологическим процессом, основные преимущества по сравнению с системами регулирования отдельных агрегатов. Состав информационных и управляющих функций АСУ ТП по энергоблоку и ТЭС в целом. Принципы автоматизированного управления: советчик оператора; супервизорное управление; централизованное управление на основе единого программно-технического комплекса (ПТК); распределенное управление.														
	Область применения, преимущества и недостатки. Концепции построения АСУ ТП энергоблоков и ТЭС: общая и частная; концептуальная модель АСУ ТП ТЭС; понятие и назначение ЛВС. Пример реализации АСУ ТП парогазовой установки: ПГУ как объект управления; состав агрегатов, основные режимы работы, информационные и управляющие функции АСУ ТП ПГУ, функциональная схема и ее основные элементы, техническая реализация на основе современного КТСА.														
	Семинарское занятие «Регулирование параметров ПГУ»			3							+				
Тема 6	Автоматизация энергоблоков ТЭС	1	6-9	6		18									
	Энергоблок ТЭС как объект управления, режимы работы по топливу и нагрузке, понятие приемистости. Назначение и состав общецелочных автоматических систем регулирования частоты и мощности; принцип функционирования. Функциональная схема АСР мощности энергоблока с прямоточным котлом. Регулирование мощности группы параллельно работающих энергоблоков, преимущества группового управления по сравнению с индивидуальным. Назначение и функционирование локальных АСР энергоблока.														
	Семинарское занятие «Расчет тепловой схемы энергоблока с прямоточным котлом»														
Форма аттестации	1												Э		
Всего часов по дисциплине в четвертом семестре			18	18		72									

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

**«Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и
теплотехнике»**

Москва
2022

Таблица 1
к приложению 2

Паспорт фонда оценочных средств

Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике					
ФГОС ВО 13.04.01 Теплотехника и теплоэнергетика					
КОМПЕТЕНЦИИ		Перечень компонентов	Технология формирования	Форма оценочного средства	Степени уровней освоения компетенций
ИНДЕКС	ФОРМУЛИРОВКА				
УК-1	способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий	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, письменное тестирование	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 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

УК-2	способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	Знать: методы и средства автоматизированных систем управления технологическими процессами в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях	Лекция, семинарские занятия, лабораторные занятия, решение ситуационных задач, СРС	Экзамен, письменное тестирование	Базовый уровень: способен к разработке автоматизированных систем управления технологическими процессами в стандартных производственных ситуациях Повышенный уровень: способен к разработке и эксплуатации автоматизированных систем управления технологическими процессами в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом
------	---	--	--	----------------------------------	--

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

Темы семинарских занятий:

1. Определение расхода энергоносителя на нужды предприятия;
2. Расчет баланса мощностей ТЭС;
3. Математические модели управления техническими системами;
4. Определение коэффициента загрузки оператора;
5. Регулирование параметров ПГУ;
6. Расчет тепловой схемы энергоблока с прямоточным котлом.

Примеры задач для семинарских занятий

Задача 1: Парогазовые установки отличаются высоким КПД, рассматриваются в перспективе как инструмент покрытия полупиковой электрической нагрузки; значительное количество ПГУ сооружается в настоящее время в России и за рубежом. Рассматривается два варианта энергоблока на базе двух турбин Ansaldo Energia V64.3A: с одним и двумя уровнями давления генерируемого в котле-утилизаторе пара.

Показатели ГТУ в значительной степени зависят от температуры воздуха перед компрессором; при изменении расхода уходящих газов и их температуры меняются и показатели утилизационного парового контура. В данном варианте рассчитывается режим работы блоков при температуре наружного воздуха, отличающейся от расчётной.

Исходные данные

Режим ПГУ в настоящем расчёте определяется температурой наружного воздуха. Для расчётного режима ПГУ она принята по среднегодовому значению для места установки (Санкт-Петербурга) по СНиП, для переменного задана преподавателем. Она влияет также на работу градирни, что сказывается на температуре охлаждающей воды [1, с. 459].

Т а б л и ц а 1. Исходные данные к расчёту номинального и переменного режима

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение на режиме	
			номинальном	изменённом
Температура наружного воздуха	$t_{н.в}$	°С	+4,4	-10,0
Температура охлаждающей воды	$t_{охл}$	°С	22	19

Решение:

1. Расчёт режима работы ГТУ

1.1. Описание ГТУ и методика расчёта

Газотурбинная установка V64.3 A итальянской фирмы Ansaldo Energia выпускается по лицензии фирмы Siemens (другое название установки SGT-1000F). В состав ГТУ входят: 15-ступенчатый осевой компрессор с подвижным входными направляющим аппаратом (ВНА), кольцевая камера сгорания, 4х-ступенчатая турбина. При частоте вращения вала турбины 5400 об/мин через редуктор может осуществляться привод генератора с частотой вращения как 3000, так и 3600 об/мин.

Работа газотурбинной части ПГУ по расчётной схеме не зависит от работы утилизационной части, поэтому она рассчитывается отдельно в первую очередь. Показатели ISO – это паспортные данные для ГТУ, приведённые для работы на чистом метане на уровне моря, при относительной влажности 60% и $t_{н.в.} = +15^{\circ}\text{C}$, без потерь давления воздуха на входе и газов на выходе. В работе учитывается, что величины температуры за газовой турбиной Т4, мощности ГТУ на клеммах генератора НГТУ, её КПД

$\eta_{ГТУ}$ и расхода уходящих газов $G_{уx}$ определяются при соответствующих наружных температурах, входных и выходных потерях давления $\Delta p_{вх} = 1$ кПа, $\Delta p_{вых} = 3$ кПа. Расчёт производится по упрощённой методике по значениям поправок на входные и выходные параметры:

$$i = k_{вх}^i k_{вых}^i k_{темп}^i i_{ISO},$$

где: i – одна из величин T_4 , $N_{ГТУ}$, $\eta_{ГТУ}$, $G_{уx}$; $k_{вх, вых, темп}^i$ – поправки соответственно на $\Delta p_{вх}$, $\Delta p_{вых}$ и $t_{н.в.}$ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Пересчёт показателей ГТУ по ISO на расчётные условия

Величина	ЕИ	Значение в условиях ISO	Поправочные коэффициенты для переменного режима			Значение на переменном режиме	Значение на номинальном режиме
			$k_{вх}^i$	$k_{вых}^i$	$k_{темп}^i$		
T_4	°С	574	1,003	1,0065	0,969	556	568
	К	847				829	841
$N_{ГТУ}$	кВт	75 000	0,983	0,9875	1,091	79 429	75 716
$\eta_{ГТУ}$	–	0,359	0,993	0,9875	1,011	0,356	0,355
$G_{уx}$	кг/с	213	0,990	1	1,074	226,47	218,25

1.2. Проверка баланса ГТУ

Проверка баланса для условий ISO и расчётного среднегодового режима выполнялась в курсе «Парогазовые установки». Аналогичным образом выполним её для переменного режима.

Расход топлива:

$$G_{топ} = \frac{N_{ГТУ}}{Q_n^p \eta_{ГТУ}} = \frac{79429}{50056 \cdot 0,356} = 4,46 \text{ кг/с},$$

расход воздуха:

$$G_в = G_{уx} - G_{топ} = 226,47 - 4,46 = 222,02 \text{ кг/с},$$

тогда с учётом того, что теоретически необходимое количество влажного воздуха $L_0 = 17,301$ кг/кг, избыток воздуха в уходящих газах:

$$\alpha_{уx} = \frac{G_в}{L_0 G_{топ}} = \frac{222,02}{17,301 \cdot 4,46} = 2,878.$$

Энтальпии уходящих газов данного состава при стандартной температуре и T_4 :

$$h_{2,878}(15^\circ\text{C}) = 299,11 \text{ кДж/кг}, h_{2,878}(568^\circ\text{C}) = 894,41 \text{ кДж/кг},$$

энтальпии воздуха при стандартной температуре и T_1

$$h_в(15^\circ\text{C}) = 290,83 \text{ кДж/кг}, h_в(-10^\circ\text{C}) = 265,53 \text{ кДж/кг}$$

(здесь и далее свойства воздуха и газов отсчитываются от абсолютного нуля по интерполяционным полиномам, приведённым в [2]). Уравнение теплового баланса ГТУ:

$$G_в(h_в(t_1) - h_в(t_{ст})) + G_{топ}(h_{топ}(p_{топ}, t_{топ}) - h_{топ}(p_{ст}, t_{ст}) + \eta_{КС} Q_n^p) =$$

$$= G_{yx} \left(h_{\alpha_{yx}}(t_4) - h_{\alpha_{yx}}(t_{ct}) \right) + N_3 / (\eta_{ЭГ} \eta_{ред} \eta_{мех}).$$

Энтальпии топлива при стандартных условиях и на входе в КС $h_{топ}$ ориентировочно равны:

$$h_{CH_4}(1 \text{ атм}, 15) = 1604,1 \text{ кДж/кг},$$

$$h_{CH_4}(25 \text{ атм}, 15) = 1579,7 \text{ кДж/кг} [3].$$

Для всех режимов считаем, что КПД генератора, редуктора, механический КПД турбины и КПД камеры сгорания равны соответственно $\eta_{ЭГ} = 0,985$, $\eta_{ред} = 0,995$, $\eta_{мех} = 0,998$, $\eta_{КС} = 0,998$. Тогда левая часть уравнения баланса равна:

$$222,02 \cdot (265,53 - 290,83) + 4,46 \cdot (1579,7 - 1604,1 + 0,998 \cdot 50056) = 217003 \text{ кДж/с},$$

правая:

$$226,47 \cdot (894,41 - 299,11) + 79429 / (0,985 \cdot 0,995 \cdot 0,998) = 216025 \text{ кДж/с},$$

невязка баланса:

$(217003 - 216025) / 217003 = 0,0045 = 0,45\%$ – в пределах погрешности расчёта.

2. Расчёт одноконтурной утилизационной ПСУ

2.1. Основные расчётные зависимости и допущения

Схема установки – дубль-блока мощностью 220 МВт – изображена на рис. 1.

Нагрев воды в деаэраторе на номинальном режиме порядка 5 град.

Конденсатный насос подаёт конденсат в газовый подогреватель конденсата, с выхода которого для предотвращения конденсации часть воды специальным насосом подаётся на вход. Далее вода поступает в деаэратор с постоянным давлением $p_d = 0,12$ МПа ($t_d = 105^\circ\text{C}$, $h'_d = 439,3$ кДж/кг, $h''_d = 2683,06$ кДж/кг). Выпар из деаэратора осуществляется в количестве $g_{\text{вып}}^k = 0,0015$ от расхода конденсата $G_k < 10$ кг/т. Деаэрированная вода питательным насосом с КПД $\eta_{\text{пн}} = 75\%$ подаётся в экономайзер, сопротивление которого $\overline{\Delta p}_{\text{ЭК}} = 0,1$. Далее питательная вода следует на всас циркуляционного насоса КПД $\eta_{\text{цн}} = 60\%$, который преодолевает сопротивление испарительной поверхности $\overline{\Delta p}_{\text{исп}} = 0,1$ (от давления в барабане p_6). Часть воды из барабана, равная $g_{\text{пр}}^n = 0,02$ от общего количества генерируемого пара, отбирается на непрерывную продувку; насыщенный пар частично направляется на обогрев деаэратора, остальной поток следует в пароперегреватель ($\overline{\Delta p}_{\text{пп}} = 0,1$) и далее, преодолев сопротивление трубопровода $\overline{\Delta p}_{\text{тр}} = 0,02$, подаётся с начальными параметрами p_0, t_0 на стопорный клапан турбины, $\overline{\Delta p}_{\text{кл}} = 0,05$. Относительный внутренний КПД сухих отсеков турбины считаем равным $\eta_{oi \text{ сух}} = 0,87$; потери от влажности учитываем по приближённой формуле Соколова. В расчёте номинального режима обязательно, а то максимум сползает:

$$y_k = (h''|_k - h_{k \text{ сух}}) \left(r|_k + K_{\text{вл}} \eta_{oi \text{ сух}} (h'' - h_{kt}) \right),$$

где: $K_{вл}$ – поправка на среднюю влажность (на сколько процентов падает КПД влажного отсека при её росте на 1%), примем $K_{вл} = 0,5$ <от 0,5 до 0,9>;

$h_{к\ суx}$ – условная энтальпия влажного пара в конденсаторе, которая была бы там, если бы КПД процесса после достижения паром параметров насыщения (энтальпии h'') сохранялся на уровне $\eta_{oi\ суx}$. Восполнение потерь рабочего тела в контуре осуществляется в прямом конденсатора насыщенной водой.

Для упрощения расчётов пренебрегаем потерями с наружным охлаждением элементов, протечками, тепловыделением в конденсатных и рециркуляционных насосах, наличием охладителей пара уплотнений и холодильников эжекторов. Считаем, что принятые относительные перепады давления сохраняются на режиме, т.е. на концах любого элемента $p_{i\ вx} = p_{i\ вых} / (1 - \overline{\Delta p}_i)$; аналогичным образом считаем постоянными КПД насосов и (сухой) турбины. Кроме того, считаем, что циркуляционные и рециркуляционные насосы перемещают те же самые расходы воды $G_{ц} = 119,49$ кг/с, $G_{рец} = 55,15$ кг/с (для упрощения вычислений все расходы приведены по отношению на один КУ). Температурный напор в конденсаторе линейно зависит от его тепловой нагрузки $Q_k = G_0 r_{кxк}$:

$$t_k - t_{охл} = (t_{к0} - t_{охл0}) \bar{Q}_k$$

(индексом 0 отмечены величины при номинальном режиме, чертой – отношения к ним величин на переменном режиме). Турбина между клапанами и конденсатором может быть рассчитана по уравнению Стодолы, которое в данном случае используется в виде:

$$p_0 = \frac{\sqrt{p_k^2 - \bar{G}_0^2 \bar{t}_0 (p_{00}^2 - p_{к0}^2)}}{1 - \delta p_{кл}}$$

(начальные температуры – в кельвинах).

Для поверхностей теплообмена в котле-утилизаторе можно написать уравнения теплообмена вида:

$$Q_i = k_i F_i \langle \Delta t \rangle_i,$$

где: Q_i – теплота, полученная от газов i -й поверхностью;

k_i – коэффициент теплопередачи;

F_i – площадь поверхности теплообмена;

Δt_i – средний температурный напор, для поверхностей с противотоком

$$\langle \Delta t \rangle_i = \frac{(T_i^{вx} - t_i^{вых}) - (T_i^{вых} - t_i^{вx})}{\ln \frac{T_i^{вx} - t_i^{вых}}{T_i^{вых} - t_i^{вx}}}$$

(T, I обозначаем температуры и энтальпии газов, t, h – воды и пара).

В действительности средний температурный напор отличается от среднелогарифмического в некоторое примерно постоянное число раз ψ , но, поскольку нас в данном расчёте интересуют относительные изменения величин, этим можно пренебречь. В испарительную поверхность сначала поступает недогретая вода, затем под напором циркуляционного насоса

пароводяная смесь кипит при температуре, большей температуры в барабане (рис. 1). Без значительного роста погрешности можем считать, что

$$\langle \Delta t \rangle_u = \frac{T_u^{\text{ВХ}} - T_u^{\text{ВЫХ}}}{\ln \frac{T_u^{\text{ВХ}} - t_{\delta}}{T_u^{\text{ВЫХ}} - t_{\delta}}}$$

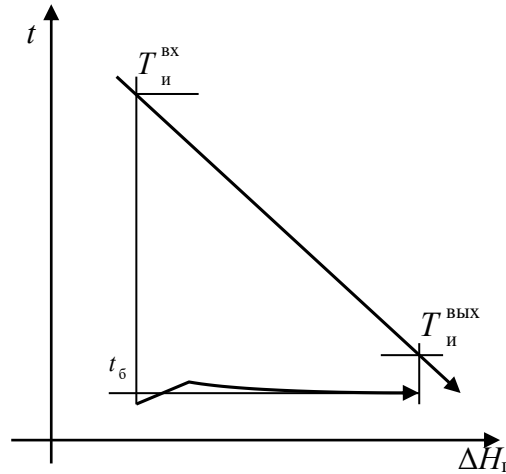


Рис. 1. T - H диаграмма

Коэффициенты теплопередачи на поверхностях нагрева зависят прежде всего от расхода газов. Из опыта практических наблюдений можем оценить их изменение по формуле $k_i = k_{i0} G_{yx}$. Параметры для элементов КУ отражены в табл. 3.

Помимо теплоты от газов, рабочее тело получает энтальпию от работы насосов:

$$\Delta h_{\text{ПН}} = \frac{v_{\delta}^{\square} + v_{\delta}^{\square}}{2} \cdot \frac{p_{\delta}/(1 - \delta p_{\text{ЭК}}) - p_{\delta}}{\eta_{\text{ПН}}},$$

$$\Delta h_{\text{ЦН}} = v_{\delta}^{\square} \frac{p_{\delta} \delta p_u}{\eta_{\text{ПН}}};$$

$$N_{\text{ЦН,ПН}} = G_{\text{ЦН,ПВ}} \Delta h_{\text{ЦН,ПН}}.$$

Т а б л и ц а 3. Параметры поверхностей теплообмена КУ

Элемент	Q_{i0} , кВт	k_{i0} , $\frac{\text{Вт}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$	Δt_{i0} , град.	F_i , тыс. м ²	k_i , $\frac{\text{Вт}}{\text{град} \cdot \text{м}^2}$
ГПК	5221	80	115,7	0,56	81,99
Экономайзер	24 012	80	47,6	6,31	81,99
Испаритель	45 445	80	62,3	9,11	81,99
Пароперегреватель	20 920	50	91,6	4,57	51,24

Составив также уравнения теплового баланса для каждого элемента котла-утилизатора:

$$G_{\text{В,П}}(h_i^{\text{ВЫХ}} - h_i^{\text{ВХ}}) = G_{\text{yx}}(I_i^{\text{ВХ}} - I_i^{\text{ВЫХ}}) + G_{\text{нас}} \Delta h_{\text{нас}}$$

и для деаэратора:

$$G_{\text{ГП}} h_{\delta}'' + G_{\text{К}} h_{\text{ГПК}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ПВ}} h_{\delta}' + G_{\text{ВЫП}} h_{\delta}'',$$

можем, в сочетании с материальными балансами элементов, уравнением турбинного процесса и таблицами свойств воды, пара и газов, получить

систему уравнений, описывающую ПГУ.

2.2. Алгоритм расчёта параметров на режиме

Сложность и нелинейность полученной модели котла-утилизатора не позволяют решать систему уравнений для ПГУ аналитически. Решение с необходимой точностью может быть получено методом последовательных приближений. Задавшись некоторыми начальными значениями ряда параметров, производят расчёт системы по имеющимся формулам и получают уточнённые значения тех же параметров, которые, если они расходятся с принятыми ранее более чем на заданную величину, подставляются в следующую итерацию. Для проведения численного расчёта на сходимость используется алгоритм со вложенными циклами, реализованный на базе электронных таблиц OpenOffice.org Calc с программированием циклов и подстановок на встроенном BASIC.

Форма представления расчётных зависимостей оказывает существенное влияние на скорость и устойчивость сходимости. Например, уравнение Стодолы можно применить для определения начального давления процесса расширения, но следует избегать его применения для расчёта конечного давления, поскольку полученная величина имеет сравнительно большой разброс и процесс вычисления может завершиться ошибкой извлечения корня из отрицательного числа. Также уравнение теплоотдачи:

$$Q_i = k_i F_i \frac{(T_i^{\text{BX}} - t_i^{\text{ВЫХ}}) - (T_i^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{BX}})}{\ln \frac{T_i^{\text{BX}} - t_i^{\text{ВЫХ}}}{T_i^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{BX}}}}$$

при решении совместно с уравнениями теплового баланса сходится по конечным температурам сред и тепловому потоку достаточно плохо, а может и расходиться (система неустойчива по отклонению температур). Значительно лучше сходится система, где уравнение теплопередачи заменено на эквивалентную подсистему

$$\left(\begin{array}{l} Q_i = \frac{(T_i^{\text{BX}} - t_i^{\text{BX}})(E_2 - E_{\text{П,В}})}{E_2/W_2 - E_{\text{П,В}}/W_{\text{П,В}}} \\ E_2 = \exp(k_i F_i / W_2), E_{\text{П,В}} = \exp(k_i F_i / W_{\text{П,В}}) \\ W_2 = Q_i / (T_i^{\text{BX}} - T_i^{\text{ВЫХ}}), W_{\text{П,В}} = Q_i / (t_i^{\text{ВЫХ}} - t_i^{\text{BX}}) \end{array} \right).$$

Данное выражение может быть заложено в отдельную подпрограмму, которая после небольшого числа циклов производит расчёт теплообменника по входным температурам и расходам сред, давлениям пара на входе и выходе, составу уходящих газов и комплексу $k_i F_i$. Теплофизические свойства веществ в программе определяются по полиномам из [2] (для газов) и формуляции IF-97 (для воды и пара). Аналогичные выражения для испарительного элемента с известной входной температурой газов и элемента с одной фазой, у которого заданы температуры сред на горячем конце, принимают вид соответственно:

$$Q_u = \frac{(T^{\text{BX}} - t_s)W_2}{1 - 1/E_2}, Q_i = \frac{(T_i^{\text{BX}} - t_i^{\text{ВЫХ}})(E_{\text{П,В}}/E_2 - 1)}{1/W_2 - 1/W_{\text{П,В}}}.$$

Расход греющего пара на деаэратор по отношению к расходу конденсата

можно определить как

$$g_{\text{ГП}}^{\text{к}} = \frac{G_{\text{ГП}}}{G_{\text{к}}} = \frac{h_{\delta}^{\square} - h_{\text{ГПК}}^{\text{ВЫХ}} + g_{\text{ВЫП}}^{\text{к}} (h_{\delta}^{\square} - h_{\delta}^{\square})}{h_{\delta}^{\square} - h_{\delta}^{\square}}$$

(следствие из теплового баланса деаэратора: теплота насыщенного пара из барабана тратится на догрев конденсата до температуры насыщения в деаэраторе и испарение выпара, вследствие чего греющий пар конденсируется). Расход конденсата, в свою очередь, должен быть таким, чтобы питать расход пара и продувки и выпар:

$$g_{\text{к}} = \frac{G_{\text{к}}}{G_0} = \frac{(1+g_{\text{ГП}})(1+g_{\text{пр}}^n)}{1-g_{\text{ВЫП}}^{\text{к}}},$$

где: $g_{\text{ГП}} = g_{\text{ГП}}^{\text{к}} g_{\text{к}}$ — один из параметров сходимости. Зная расход греющего пара, легко найти все расходы по элементам КУ из их материальных балансов.

Кроме того, для улучшения сходимости можно использовать переходы, отличающиеся от простой подстановки нового значения (при этом последовательность таких переходов должна сходиться к требуемой величине). Например, итерации по недогреву в экономайзере $\delta t_{\text{нед}} = t_{\delta} - t_{\text{ЭК}}^{\text{ВЫХ}}$ выполняют переход в зависимости не только от значения, определённого по расчёту элементов, но и от значений, принятого изначально и полученного на предыдущей итерации. Циклы с мало зависящими друг от друга переменными для упрощения алгоритма можно объединять; в самом внешнем (нулевого уровня) цикле все критерии сходимости опять проверяются, и если хотя бы один из них не выполнен, расчёт продолжается (циклы остальных уровней реализованы с постусловием).

Список переменных, определяемых для данного алгоритма методом последовательных приближений, представлен в табл. 4. После 51 цикла нижнего уровня (по t_0) алгоритм сошёлся с требуемой точностью, результаты приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 4. Организация расчёта на сходимость: циклы и переменные

Уровень цикла	Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Критерий сходимости	Новое значение	Число шагов
1	Удельный расход греющего пара	$g_{гп}$	–	$\frac{(g_{гп} - g_{гп}^{(h)})}{g_{гп}} \leq 0,0001$	$\frac{g_{пв}h'_{\delta} + g_{вып}h''_{\delta} - g_{к}h_{гпк}^{вых}}{h''_{\delta}}$	17
	Недогрев в экономайзере до t_{δ}	$\delta t_{нед}$	град.	$(\delta t_{нед} - \delta t'_{нед}) \leq 0,05^{\circ}$	$[\delta t'_{нед} = t_{\delta} - t_{эк}^{ввых}] f(\delta t_{нед})$ $(\delta t'_{нед}, \delta t_{нед}^{(ст)}, \delta t'_{нед}^{(ст)})$	
	Температура в конденсаторе	$t_{к}$	град.	$(t_{к} - t_{к}^{(h)}) \leq 0,05^{\circ}$	$t_{охл} + (t_{к0} - t_{охл0})\bar{Q}_{к}$	
2	Расход свежего пара	G_0	кг/с	$\left(1 - \frac{Q_u(\tau/пер.)}{Q_u(\text{пар}) - Q_{пн}}\right) \leq 5 \cdot 10^{-5}$	$G_0 \frac{Q_u(kF_u, G_{yx}, t_{\delta}, T_u^{вх})}{(G_0 + G_{гп})(h''_u + g_{пв}h'_u)}$	48
3	Температура свежего пара	t_0	град.	$\left(1 - \frac{Q_{пе}(\tau/пер.)}{Q_{пе}(\text{пар})}\right) \leq 2,5 \cdot 10^{-5}$	$t_n(p_0, h''_{\delta} + Q_{пе}/G_0)$	51

2.3. Проверка расчёта КПД ПГУ по обратному методу

КПД ПГУ при расчёте определялся по прямому методу:

$$\eta_{ПГУ} = \frac{\sum N_3}{\sum B_{\text{топ}} Q_i^r} = \frac{2 \cdot 79429 + 64112}{2 \cdot 4,46 \cdot 50056} = 0,499.$$

Расчёт по обратному методу базируется на анализе потерь:

$$\eta_{ПГУ} = 1 - \frac{\sum Q_{\text{пот}}}{\sum B_{\text{топ}} Q_i^r}$$

Потери энергии в ПГУ включают следующие компоненты:

– теплота уходящих газов, за вычетом теплоты воздуха и топлива:

$$Q_{yx} = 2(G_{yx}I_{yx} - G_{в}I_{в-10} - G_{\text{топ}}h_{\text{топ}}) = 2 \cdot (226,47 \cdot 472,98 - 222,02 \cdot 225,63 - 4,46 \cdot 1579,7) = 79\,083 \text{ кДж/с};$$

– теплота, отводимая в конденсаторе:

$$Q_{к} = 2G_0(h_{к} - h_{к}') = 2 \cdot 28,57 \cdot (2323,49 - 142,16) = 128\,093 \text{ кДж/с};$$

– потери в ГТУ в генераторе, на трение в подшипниках и редукторе и наружное охлаждение:

$$2Q_{\text{пот ГТ}} = 2 \cdot \left(N_{\text{э ГТ}} \left(\frac{1}{(\eta_z \eta_m \eta_p)} - 1 \right) + B_{\text{топ}} Q_i^r (1 - \eta_{кс}) \right) =$$

$$= 2 \cdot (79429 \cdot (1/(0,985 \cdot 0,998 \cdot 0,995) - 1) + 4,46 \cdot 50056 \cdot 0,002) \\ = 4447 \text{кДж/с};$$

– потери в генераторе и на трение в утилизационной установке:

$$\Delta N_{\text{ит}} = N_{\text{г}}(1/(\eta_{\text{м}}\eta_{\text{г}})-1) = 64540 \cdot (1/(0,995 \cdot 0,985)-1) = 1303 \text{кДж/с};$$

– потери с рабочим телом (выпар, продувка) с отсчётом от энтальпии подпитки:

$$Q_{\text{р.т}} = 2G_0(g_{\text{вып}}h''_{\text{д}} + g_{\text{пр}}h'_{\text{б}} - g_{\text{дв}}h'_{\text{к}}) = \\ = 2 \cdot 28,57 \cdot (0,00153 \cdot 2683,06 + 0,021 \cdot 1290,99 - 0,02253 \cdot 142,16) \\ = 1532 \text{кДж/с.}$$

$$\eta_{\text{ПГУ}} = 1 - \frac{79083+128093+4447+1303+1532}{2 \cdot 4,46 \cdot 50056} = 1 - \frac{214458}{446439} = 0,520,$$

полученное расхождение 0,02 можно объяснить небалансом ГТУ (0,45%), принятыми величинами расхождения при расчёте на сходимость и неточностью методики обратного подсчёта (в знаменателе физическая теплота топлива не учтена, в числителе она отсчитывается от условного уровня абсолютного нуля, не совпадающего в силу реально-газовых свойств метана с аналогичной точкой отсчёта для уходящих газов).

Т а б л и ц а 5 . Результаты итеративного расчёта одноконтурной ПГУ

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
Температура в конденсаторе		°С	33,9	-3,1
Давление там же		кПа	5,3	-16%
Энтальпия насыщенной воды там же		кДж/кг	142,16	-12,84
Энтальпия насыщенного пара там же		кДж/кг	2562,66	-5,51
Температура пара перед турбиной		°С	525	-10
Давление там же		МПа	5,4	-0,30%
Энтальпия там же		кДж/кг	3488,41	-0,66%
Давление в барабане		МПа	6,12	-0,30%
Температура там же		°С	277	-0,07%
Энтальпия насыщенной воды там же		кДж/кг	1220,71	-0,08%
Энтальпия насыщенного пара там же		кДж/кг	2783,18	0,01%
Энтальпия на выходе из экономайзера		кДж/кг	1176,74	0,55%
Объём воды в циркуляционном насосе		м³/кг	0,00132	-0,05%
Приращение энтальпии там же		кДж/кг	1,4	-0,35%
Температура газов на выходе из испарителя (<i>pinch-point</i>)		°С	287	-0,05%
Энтальпия газов там же		кДж/кг	590,03	0,00%
Энтальпия воды на выходе из ГПК		кДж/кг	331,44	-0,80%
Расход греющего пара на обогрев 1 кг конденсата		–	0,05	2,44%
Удельный расход конденсата		–	1,023	0,00%
Удельный расход греющего пара		–	0,049	2,44%
" – " – " выпара		–	0,00153	0,00%
" – " – " продувки		–	0,021	0,11%
" – " – " добавочной воды		–	0,0225	0,10%

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
" – " – " питательной воды		–	1,069	0,11%
Тепловая мощность испарителя		кДж/с	48581	0,04%
Удельный расход пара		кг/кг	0,128	-3,51%
Расход свежего пара		кг/с	28,92	0,32%
		т/ч	8,03	
Температура на выходе из ГПК		°С	79	-0,79%
Тепловая мощность ГПК		кДж/с	5567	5,45%
Приращение энтальпии в питательном насосе		кДж/кг	9,32	-0,31%
Тепловая мощность экономайзера		кДж/с	22523	1,34%
Энтальпия уходящих газов		кДж/кг	466	0,48%
Температура уходящих газов		°С	173	1,98
Энтальпия газов за пароперегревателем		кДж/кг	804,54	-1,04%
Температура газов там же		°С	478	-1,55%
Энтальпия газов за экономайзером		кДж/кг	490,58	0,52%
Температура газов там же		°С	196	1,19%
Температура на выходе из экономайзера		°С	268	0,48%
Давление пара за клапанами		МПа	5,13	-0,30%
Энтропия свежего пара		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,0121	-0,39%
Энтропия пара за клапанами		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,0349	-0,39%
Энтальпия конца адиабатного процесса расширения		кДж/кг	2275,01	-0,49%
Энтальпия в конденсаторе		кДж/кг	2357,57	0,28%
Энтропия там же		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,7	1,14%
Влажность там же		–	0,084934	-0,005
Внутренняя мощность паровой турбины		МВт	65415	-2,26%
Электрическая мощность ПСУ		МВт	64112	-2,26%
Электрическая мощность ПГУ		МВт	222969	2,74%
КПД ПГУ		–	0,500	-0,0090
Минимальный температурный напор		град.	10,07	0,07
Недогрев до кипения в экономайзере		град.	8,52	-1,48

3. Расчёт двухконтурной утилизационной ПСУ

3.1. Основные особенности расчётной модели по сравнению с одноконтурной

Схема ПГУ с паровым циклом двух давлений приведена на рис. 7. Из общего ГПК конденсат поступает в деаэратор и разделяется на два потока, подаваемые двумя независимо регулируемые группами питательных насосов различного напора и подачи в два экономайзера. Испаритель низкого давления установлен в рассечку экономайзера высокого давления (ЭкВ), экономайзер низкого давления параллелен первой ступени этого

экономайзера (условно считаем, что перепад давления поделён между двумя ступенями ЭКВ поровну). Вторая ступень ЭКВ параллельна пароперегревателю низкого давления (ПеН). Деаэратор обогревается насыщенным паром низкого давления; весь пар высокого давления поступает через ПеВ в голову турбины. На той ступени, где это возможно, к нему подмешивается свежий пар низкого давления, и далее оба потока работают совместно до конденсатора; камера смешения учитывается как перепад давления $\delta p_{\text{кС}} = 0,03$ для обоих потоков. Таким образом, система уравнений для турбины состоит из условия согласования потоков по давлению $p_{\text{СМВ}} = p_{0\text{Н}}^{\square}$ и уравнений Стодолы для отсеков:

$$p_{\text{СМВ}} = \sqrt{p_{\text{к}}^2 - (G_{0\text{В}} + G_{0\text{Н}})^2 \bar{t}_{\text{СМ0}} (p_{\text{СМ0}}^2 - p_{\text{к0}}^2)},$$

$$p_{0\text{В}} = \frac{\sqrt{p_{\text{СМВ}}^2 - \bar{G}_{0\text{В}}^2 \bar{t}_{0\text{В}} (p_{00}^2 - p_{\text{СМВ0}}^2)}}{1 - \delta p_{\text{кЛ}}},$$

где: $p_{\text{СМВ}}$ – давление отработавшего потока пара высокого давления перед смешением. Для камеры смешения можно также записать тепловой баланс:

$$h_{\text{СМ}} (G_{0\text{В}} + G_{0\text{Н}}) = h_{\text{СМВ}} G_{0\text{В}} + h_{0\text{Н}} G_{0\text{Н}}.$$

Расчёт котла-утилизатора производится аналогично предыдущему варианту, с отсчётом энтальпий от выхлопа газовой турбины. Сложность представляет запись уравнений теплообмена для элементов КУ с параллельными потоками (ЭКВ1 и ЭКН, ЭКВ2 и ПеН), которые являются трёхпоточными теплообменниками. Поскольку для номинального режима принято, что оба потока влияют на температуру газов одинаково, фактически в этом случае они представляют собой два параллельно включённых по газам двухпоточных теплообменника, расход газов между которыми распределён пропорционально тепловосприятости соответствующих пучков. Учитывая, что параметры охлаждения газов и на переменном режиме остаются близки и любой уровень их смешения между пучками мало повлияет на результат, можем продолжать считать потоки газов около параллельных поверхностей разделёнными. Тепловой баланс элемента «а+б» с параллельными поверхностями «а» и «б» по газам будет записан как

$$Q_{\text{а+б}} = G_{\text{уХ}} (I_{\text{а+б}}^{\text{ВХ}} - I_{\text{а+б}}^{\text{ВЫХ}}), \quad I_{\text{а+б}}^{\text{ВЫХ}} = (I_{\text{а}}^{\text{ВЫХ}} G_{\text{Г а}} + I_{\text{б}}^{\text{ВЫХ}} G_{\text{Г б}}) / G_{\text{уХ}}.$$

3.2. Расчёт двухконтурной модели

В этой модели число расчётных величин и трансцендентных уравнений почти удвоилось по сравнению с предыдущей, поэтому алгоритм получается сложнее и глубина циклов больше. Тем не менее, общий принцип решения задачи тот же самый. Данные о теплообмене представлены в табл. 6, информация о циклах и переменных – в табл. 7, алгоритм и список равенств – в приложениях 3 и 4, результаты расчёта – в табл. 8.

3.3. Проверка расчёта КПД ПГУ по обратному методу

Проверка ведётся аналогично предыдущему пункту, с учётом потерь на продувку из двух контуров:

$$Q_{\text{уХ}} = 2(G_{\text{уХ}} I_{\text{уХ}} - G_{\text{ВВ-10}} h_{\text{ВВ-10}} - G_{\text{ТОП}} h_{\text{ТОП}}) = 2 \cdot (226,47 \cdot 382,3 - 222,02 \cdot 225,63 - 4,46 \cdot 1579,7) = 41\,173 \text{ кДж/с};$$

$$Q_{\text{к}} = 2 \Sigma G_0 (h_{\text{к}} - h_{\text{к}}') = 2 \cdot 35,64 \cdot (2330,31 - 142,16) = 155\,924 \text{ кДж/с};$$

$$2Q_{\text{пот ГТ}} = \text{const} = 4447 \text{ кДж/с};$$

$$\Delta N_{\text{ит}} = N_{\text{Г}}(1/(\eta_{\text{м}}\eta_{\text{Г}})-1) = 74025 \cdot (1/(0,995 \cdot 0,985)-1) = 1504 \text{ кДж/с};$$

$$Q_{\text{р.т}} = 2(G_{\text{вып}}h''_{\text{д}} + g_{\text{пр}}(G_{0\text{в}}h'_{\text{бв}} + (G_{0\text{н}} + G_{\text{гп}})h'_{\text{бн}}) - G_{\text{дв}}h'_{\text{к}})$$

$$= 2 \cdot (0,05 \cdot 2683,06 + \quad)$$

$$(\quad + 0,02 \cdot (29,37 \cdot 1320,21 + 8,0 \cdot 494,78) - 8,0 \cdot 142,97) = 1773,12;$$

$$\eta_{\text{ПГУ}} = 1 - \frac{41173+155924+4447+1773+1505}{2 \cdot 4,46 \cdot 50056} = 1 - \frac{204824}{446439} = 0,541,$$

прямым методом получалось 0,522; причины расхождения аналогичны предыдущему пункту.

Т а б л и ц а 6. Параметры поверхностей теплообмена двухконтурного КУ

Элемент	Q_{i0} , кВт	k_{i0} , $\frac{\text{Вт}}{\text{град}\cdot\text{м}^2}$	$\langle\Delta t\rangle_{i0}$, град.	F_i , тыс. м ²	k_i , $\frac{\text{Вт}}{\text{град}\cdot\text{м}^2}$
ГПК	6450	80	115,7	2,37	81,99
Экономайзеры: первый ВД	1310	80	17,91	0,91	81,99
второй ВД	22875,92	80	44,48	6,43	81,99
низкого давления	62	80	12,24	0,06	81,99
Испарители: Высокого давления	43810,07	80	60,8	9,01	81,99
Низкого давления	17164,88	80	34,68	6,19	81,99
Пароперегреватели: Высокого давления	21594,08	50	89,03	4,85	51,24
Низкого давления	1847,51	50	54,69	4,5	51,24

Т а б л и ц а 7. Организация расчёта на сходимость: циклы и переменные

Уровень цикла	Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Критерий сходимости	Новое значение	Число шагов
1	Начальное давление пара ВД	$p_{0в}$	МПа	$(p_{0в} - p_{0в}^{(h)}) < 10\text{Па}$	по (2)	16
	Температура в конденсаторе	t_k	град.	$(t_k - t_k^{(h)}) \leq 0,05^\circ$	$t_{охл} + (t_{к0} - t_{охл0})\bar{Q}_k$	
2	Относительное давление смеси	$p_{см}/p_{0в}$	—	$(p_{см} - p_{см}^{(h)}) \leq 1\text{Па}$	$p_{см}(\text{по (1)})/p_{0в}$	26
2	Расход свежего пара ВД	$G_{0в}$	кг/с	$(G_{0в} - G_{0в}^{(h)}) \leq 10^{-5}\text{кг/с}$	$\frac{Q_{ив}(kF_{ив}, G_{yx}, t_{\delta}, T_{ив}^{BX}) + Q_{гпк}(T/о)/G_k}{h''_{\delta в} + g_{пр}h'_{\delta в} - (1 + g_{пр})h'_{\delta в}}$	82
3	Относительный расход свежего пара НД	$g_{0н}$	—	$(G_{0н} - g_{0н}^{(h)}G_{0в}) \leq 10^{-4}\text{кг/с}$	$\frac{Q_{ин}(kF_{ин}, G_{yx}, t_{\delta}, T_{ин}^{BX}) + Q_{гпк}(T/о)/G_k}{h''_{\delta н} + g_{пр}h'_{\delta н} - (1 + g_{пр})h'_{\delta н}}$	56
4	Энтальпия на выходе из ГПК	$h_{гпк}^{вых}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$(h_{гпк}^{вых} - h'_k - \frac{Q_{гпк}(T/о)/G_k}{G_k}) \leq 0,01\text{кДж/кг}$	$\frac{h_{гпк}^{вых} + h'_k + Q_{гпк}(T/о)/G_k}{2}$	63
5	Энтальпия на выходе из экономайзера ВД	$h_{эвк}^{вых}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$(h_{эвк}^{вых} - h_{эвк}^{вых(h)}) \leq 0,01\text{кДж/кг}$	$h_{эвк1}^{вых} + Q_{эвк2}(T/о)/G_{пвв}$	63
5	Тепловая мощность второй ступени экономайзера ВД	$Q_{эвк2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{с}}$	$(Q_{эвк2} - Q_{эвк2}^{(h)}) \leq 0,01\frac{\text{кДж}}{\text{с}}$	$Q_{эвк2}(kF_{эвк2}, G_{г\text{эвк}2}, G_{пвв}, t_{эвк1}^{вых}, T_{ив}^{вых})$	63

Т а б л и ц а 8. Результаты итеративного расчёта двухконтурной ПГУ

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
Температура в конденсаторе		°С	34,12	-2,9
Давление там же		кПа	5,4	-15%
Энтальпия насыщенной воды там же		кДж/кг	142,97	-12,04
Энтальпия насыщенного пара там же		кДж/кг	2563,0	-5,17
Температура пара перед турбиной		°С	525	-10
Давление там же		МПа	7,11	1,52%
Энтальпия там же		кДж/кг	3470,67	-0,71%
Давление в барабане ВД		МПа	8,07	1,52%
Температура там же		°С	296	0,36%
Энтальпия насыщенной воды там же		кДж/кг	1320,21	0,44%
Энтальпия насыщенного пара там же		кДж/кг	2757,64	-0,07%
Энтальпия на выходе из ЭкВ		кДж/кг	1272,51	1,01%
Объём воды в цирк. насосе ВД		м³/кг	1,39E-03	0,29%
Приращение энтальпии там же		кДж/кг	1,86	1,81%
Температура газов на выходе из испарителя ВД		°С	305,53	0,33%
Энтальпия газов там же		кДж/кг	610,42	0,20%
Давление свежего пара НД		МПа	0,164	3,92%
Давление в барабане НД		МПа	0,19	3,92%
Температура там же		°С	117,88	1,03%
Энтальпия насыщенной воды там же		кДж/кг	494,78	1,04%
Энтальпия насыщенного пара там же		кДж/кг	2702,84	0,07%
Удельный расход пара ВД		кг/кг	0,130	-3,72%
Расход свежего пара ВД		кг/с	29,37	0,10%
		т/ч	8,16	
Энтальпия воды на выходе из ГПК		кДж/кг	335,62	0,45%
Энтальпия воды на выходе из ЭкН		кДж/кг	450,67	0,74%
Температура там же		°С	107,47	0,73%
Энтальпия воды на выходе из ЭкВ1		кДж/кг	450,67	0,74%
Удельный объём воды в циркуляционном насосе НД		м³/кг	0,00106	0,10%
Приращение энтальпии в циркуляционном насосе НД		кДж/кг	0,03	4,03%
Температура газов за ИН		°С	128	1,31%
Энтальпия газов там же		кДж/кг	418,73	0,44%
Тепловая мощность ЭкВ2		кДж/с	23450,58	2,51%
Тепловая мощность ПеН		кДж/с	1939,31	4,97%
Относительный расход пара НД		–	0,214	6,55%
Температура свежего пара НД		°С	270	-1,52
Энтальпия свежего пара НД		кДж/кг	3011,79	-0,11%
Расход свежего пара НД		кг/с	6,28	6,66%
		т/ч	1,74	
Энтальпия на выходе из ГПК		кДж/кг	335,62	0,45%
Соотношение начальных давлений	$p_{0н}/p_{0в}$	–	0,0230	2,37%
Расход конденсата		кг/с	36,44	1,20%
"-" греющего пара		кг/с	1,72	-0,29%

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
"-" питательной воды ВД		кг/с	29,95	0,10%
"-" питательной воды НД		кг/с	8,16	5,56%
Тепловая мощность ЭкВ1		кДж/с	1137	-13,23%
Тепловая мощность ЭкН		кДж/с	92	49,05%
Приращение энтальпии в питательном насосе ВД		кДж/кг	12,35	1,54%
"-"-"-"-" НД		кДж/кг	0,12	9,92%
Тепловая мощность ГПК		кДж/с	7021	8,86%
Энтальпия газов на входе в ГПК		кДж/кг	413,3	0,66%
Энтальпия уходящих газов		кДж/кг	382,3	0,35%
Температура уходящих газов		°С	94	1,2
Энтальпия газов на входе в ИВ		кДж/кг	802,15	-1,01%
Температура там же		°С	476	-1,50%
Энтальпия газов на входе в ИН		кДж/кг	498,31	0,53%
Температура там же		°С	203	1,17%
Температура на выходе из ЭкВ2		°С	287	2,4
Температура на выходе из ЭкВ1		°С	115	0,0
Давление пара ВД за клапанами		МПа	6,76	1,52%
Энтропия свежего пара ВД		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	6,8683	-0,54%
Энтропия пара ВД за клапанами		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	6,8908	-0,54%
Давление пара НД за клапанами		МПа	0,156	3,92%
Энтропия свежего пара НД		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,8777	-0,30%
Энтропия пара НД за клапанами		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,9013	-0,30%
Теоретическая энтальпия пара ВД перед камерой смешения		кДж/кг	2571,43	-0,32%
Энтальпия пара ВД перед камерой смешения		кДж/кг	2688,33	-0,38%
Давление в камере смешения		МПа	0,151	0,81%
Энтальпия там же		кДж/кг	2745,3	-0,23%
Энтропия там же		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,3516	-0,26%
Температура там же		°С	136,48	-2,15%
Давление конца расширения сухой смеси пара		МПа	0,094	6,98%
Энтальпия в той же точке		кДж/кг	2672,02	0,11%
Энтропия в той же точке		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,3811	-0,31%
Энтальпия конца адиабатного процесса расширения от той же точки		кДж/кг	2259,41	-1,17%
Энтальпия конца процесса расширения от той же точки с «сухим» КПД		кДж/кг	2313,05	-0,98%
Влажность пара на выхлопе		–	0,096154	6,84%
Энтальпия в конденсаторе		кДж/кг	2330,31	-0,88%

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
Энтропия там же		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,6119	-0,01%
Внутренняя мощность паровой турбины		МВт	75530	-0,65%
Электрическая мощность ПСУ		МВт	74025	-0,65%
Электрическая мощность ПГУ		МВт	232882	3,07%
КПД ПГУ		–	0,522	-0,08
Температура питательной воды ВД		°С	106	0,18%
Температура газов на входе в ГПК		°С	123	2,06%
Энтропия пара ВД перед камерой смешения		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	7,19	-0,61%
Относительный внутренний КПД нижнего отсека		–	0,84	-0,43%
Тепловая мощность ПеВ		кДж/с	20938,55	-3,04%
"_"_" ИВ		кДж/с	43421	-0,89%
"_"_" ИН		кДж/с	18024	5,01%
Относительное давление смешения	$p_{см}/p_{0в}$	–	0,0212	-0,71%
Мин. температурный напор на ИВ		град.	9,96	-0,04
Недогрев до кипения в ЭкВ		град.	8,67	-1,33
Мин. температурный напор на ИН		град.	10,46	0,46
Недогрев до кипения в ЭкН		град.	10,41	0,41

Итоги расчёта параметров ПГУ и их изменения по сравнению с номинальными при снижении температуры окружающего воздуха на $4,4 - (-10) = 14,4^\circ\text{C}$ приведены в следующей табл. 9.

Т а б л и ц а 9. Итоги расчёта (величины и их приращения от номинальных значений)

Параметр	Обозначение	ЕИ	Одноконтурный КУ	Двухконтурный КУ	
				ВД	НД
Температура свежего пара	t_0	°С	525(-10)	525(-10)	270(-1,52)
Удельный расход пара	d	кг/кг	0,128 (-3,51%)	0,130 (-3,27%)	0,028 (+2,59%)
Минимальный температурный напор в испарителе	δt	град.	10,07 (+0,07)	9,96 (-0,04)	10,46 (+0,46)
Недогрев в экономайзере	$\delta t_{нед}$	град.	8,52 (-1,48)	8,67 (-1,33)	10,41 (+0,41)
Температура уходящих газов	$T_{ух}$	°С	173(+2,0)	94(+1,2)	
Мощность ПСУ	$N_{эпт}$	кВт	64112(-2,26%)	74025(-0,65%)	
КПД ПГУ	$\eta_{пгу}$	–	0,500(-0,009)	0,522(-0,08)	

При снижении температуры окружающего воздуха растёт расход газов и снижается их температура. Хотя в конвективных поверхностях нагрева при росте расхода усиливается теплообмен, для пароперегревателя влияние температуры сильнее, и t_0 падает. Аналогичным образом снижается удельное

теповосприятие испарителя, а значит, удельный расход пара. Однако для испарителя низкого давления из-за повышения энтальпии уходящих газов и снижения отбора от них тепла эффект получается уже противоположный; в любом случае растёт температура уходящих газов, и, следовательно, снижается КПД ПГУ. Снижение КПД менее выражено на одноконтурной установке, где рост абсолютного расхода пара компенсирует для паровой турбины снижение его параметров, но всё равно на двухконтурной он остаётся выше. При этом мощность всей ПГУ в зоне работы ГТУ при $T_4 = \text{const.}$ растёт при снижении температуры перед компрессорами.

Вопросы к экзаменам

1. Место систем управления и контроля технологическими процессами в структуре энергетического комплекса предприятия;
2. Принципы эффективного использования тепловой энергии;
3. Понятие управления, цели управления, критерии качества управления, объекта управления, автоматической системы управления;
4. Автоматическое регулирование. Классификация систем автоматического регулирования (АСР), элементы АСР;
5. Организация управления технологическими процессами на ТЭС;
6. Баланс мощностей в ЭС, основные ТЭП;
7. Понятие объединенной ЭС (ОЭС), баланс мощностей в ОЭС, структура и задачи оптимального управления ОЭС, глобальная целевая функция;
8. ЭС и ОЭС как автоматизированные технологические и производственные комплексы (АТК и АПК);
9. Понятия и признаки многоуровневых иерархических систем (МИС), примеры МИС в энергетике;
10. Иерархия математических моделей (МИС), стратификация, условия стратификации реальных систем, элементы математического описания МИС;
11. Технологические множества и примеры их использования в задачах оптимального управления;
12. Понятие и назначение дерева целей МИС, иерархия и последовательность принятия решений; лицо, принимающее решение, (ЛПР) и решающие элементы (ЭР), примеры;
13. Трехслойная система принятия решений в МИС, назначение основных элементов;
14. Организационная структура МИС, страта, слой и звено как составные элементы МИС;
15. Организация оперативно-диспетчерского управления ТЭС, влияющие факторы;
16. Обобщенный энергоблок как объект управления;
17. Понятие функциональной группы и подгруппы (ФГ и ФПГ) технологического оборудования, состав ФГ по котлу, турбине и вспомогательному оборудованию, организация управления на основе ФГ;
18. Комплекс технических средств автоматизации (КТСА) как составной элемент систем диспетчерского управления, основные элементы КТСА;
19. Эргономика автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора энергоблока, основные понятия и определения;
20. Алгоритмизация процедуры принятия решения по управлению, примеры;
21. Основные показатели оперативной загруженности дежурного персонала энергоблоков;

22. Формирование загрузки оператора в условиях эксплуатации на рабочем месте, понятие и определение оптимального коэффициента загрузки;
23. АСУ ТП энергоблока как система управления единым технологическим процессом, основные преимущества по сравнению с системами регулирования отдельных агрегатов;
24. Состав информационных и управляющих функций АСУ ТП по энергоблоку и ТЭС в целом;
25. Принципы автоматизированного управления: советчик оператора, супервизорное управление, централизованное управление на основе единого программно-технического комплекса (ПТК), распределенное управление;
26. Область применения, преимущества и недостатки;
27. Концепции построения АСУ ТП энергоблоков и ТЭС: общая и частная; концептуальная модель АСУ ТП ТЭС; понятие и назначение ЛВС;
28. Пример реализации АСУ ТП парогазовой установки;
29. ПГУ как объект управления: состав агрегатов, основные режимы работы, функциональная схема и ее основные элементы, техническая реализация на основе современного КТСА;
30. Энергоблок ТЭС как объект управления, режимы работы по топливу и нагрузке, понятие приемистости;
31. Назначение и состав общецелочных автоматических систем регулирования частоты и мощности; принцип функционирования;
32. Функциональная схема АСР мощности энергоблока с прямоточным котлом;
33. Регулирование мощности группы параллельно работающих энергоблоков, преимущества группового управления по сравнению с индивидуальным;
34. Назначение и функционирование локальных АСР энергоблока;
35. Назначение и состав элементов устройств логического управления (УЛУ) вспомогательных установок энергоблока;
36. Назначение классификации автоматических тепловых защит (ТЗ) оборудования энергоблоков;
37. Состав и релейные эквиваленты основных логических элементов ТЗ, показатели и пути обеспечения надежности ТЗ;
38. Логическая схема действия ТЗ моноблока;
39. Понятие автоматического пуска энергоблока ТЭС, этапы пуска блока с барабанным котлом;
40. АСР процессом пуска энергоблока ПГС по температуре и давлению пара в барабане и за котлом;
41. Автоматическая система разворота и нагружения турбогенератора;
42. Особенности и укрупненный алгоритм пуска энергоблока с прямоточным котлом;
43. Состав агрегатов энергоблока ПГУ, основные режимы работы;
44. Информационные и управляющие функции АСУ ТП ПГУ;
45. Сущность технологического процесса и его показатели в физическом

и информационном смысле: понятия «вход», «выход», «связь»;

46. Сущность понятий «частотные характеристики»: виды, способы получения и области использования;

47. Сущность понятия «передаточная функция»: способы получения и области использования;

48. Выбор закона регулирования в зависимости от свойств ОУ;

49. Виды датчиков и измерителей параметров технологических процессов;

50. Техничко-экономические предпосылки автоматизации.

Вопросы для тестирования

1. Организация управления технологическими процессами в теплоэнергетике;
2. Принципы автоматизированного управления технологическим объектом;
3. Управление технологическим объектом в режимах: «советчика» оператору, супервизорного управления, прямого цифрового управления, распределенного цифрового управления;
4. Исследование объектов управления (ОУ) аналитическим методом;
5. Исследование объектов управления (ОУ) методом активного эксперимента;
6. Исследование объектов управления (ОУ) методом пассивного эксперимента;
7. Характеристика принципов, методов и технических средств систем управления химико-технологическими процессами;
8. Структура современных автоматизированных систем управления и приемы использования систем аварийного контроля, сигнализации и блокировки;
9. Функции и обеспечение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП);
10. Управление технологическими процессами и технологические параметры;
11. Автоматизация теплоэнергетического производства и реализации продукции (энергосбыт);
12. Управление рабочими механизмами;
13. Представление систем управления и элементов систем и средств управления как объектов проектирования;
14. Оптимизация и управление технологическим процессом;
15. Системы автоматизации и управления технологическими процессами в теплоэнергетике;
16. Адаптивные системы автоматического управления;
17. Виды автоматических систем управления и контроля;
18. Выбор систем контроля и управления доступом;
19. Автоматизация ТЭК;
20. Взаимосвязь технологических и организационно-управленческих структур.