МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

УТВЕРЖДАЮ
Декан Факультета урбанистики и
городского хозяйства
_____ / Л.А. Марюшин/

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Логическое управление и защита энергооборудования»

Направление подготовки
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки
Теплоэнергетические установки, системы и комплексы

Квалификация (степень) выпускника
Бакалавр

Форма обучения
Очная

Москва
2022

1. Цели освоения дисциплины

К **основным целям** освоения дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» следует отнести:

– формирование знаний о современных принципах, методах и средствах логического управления и защиты энергооборудования, входящего в состав энергетического комплекса промышленных предприятий;

– изучение способов повышения эффективности эксплуатации, логического управления и защиты энергооборудования, входящего в состав энергетического комплекса промышленных предприятий, выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать и решать задачи обеспечения защиты теплоиспользующих и энергетических установок.

– 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 логического управления и защиты энергооборудования, входящего в состав энергетического комплекса промышленных предприятий.

К **основным задачам** освоения дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» следует отнести:

– выработать навыки у студентов самостоятельно формулировать задачи логического управления и защиты энергооборудования, входящего в состав энергетического комплекса промышленных предприятий;

– научить мыслить системно на примерах повышения эффективности логического управления и защиты энергооборудования, входящего в состав энергетического комплекса промышленных предприятий с учетом технологических, экологических и экономических факторов;

– научить анализировать существующие методы логического управления и защиты энергооборудования;

– дать информацию о новых методах логического управления и защиты энергооборудования в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать преимущества и недостатки таких методов, как отечественных, так и зарубежных;

– научить анализировать результаты логического управления и защиты энергооборудования, производить поиск оптимизационного решения с помощью всевозможных методов.

2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата

Дисциплина «Логическое управление и защита энергооборудования» относится к числу профессиональных учебных дисциплин вариативной части основной образовательной программы бакалавриата.

«Логическое управление и защита энергооборудования» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

В вариативной части цикла дисциплин:
– Котельные установки и парогенераторы;
– Оборудование и установки водоподготовительных систем;
– Источники и системы теплоснабжения предприятий и ЖКХ.
В части цикла дисциплин по выбору:
– Теплоэнергетические системы промышленных предприятий;
– Электроснабжение промышленного предприятия;
– Высокотемпературные процессы и установки;
– Эксплуатация теплоэнергетических установок и систем.

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-5	способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин на объектах теплоэнергетики и теплотехники	**знать:** • Методы поиска, хранения, обработки и анализа информации из разных источников и баз данных; • информационные, компьютерные и сетевые технологии **уметь:** • осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из разных источников и баз данных; • представлять информацию в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий **владеть:** • методами поиска, хранения, обработки и анализа информации из разных источников и баз данных; • информационными, компьютерными и сетевыми технологиями

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **2** зачетные единицы, т.е. **72** академических часа (из них лекции – 18 часов, семинарские занятия – 18 часа, самостоятельная работа студентов – 36 часа).

Структура и содержание дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

Содержание разделов дисциплины

Пятый семестр

Тема 1. Назначение автоматических защит

Автоматические системы защиты теплового оборудования от повреждений. Главные и локальные ТЗ. Современные защитные устройства на ТЭС.

Тема 2. Логические элементы защит

Составные управляющие и исполнительные элементы тепловых защит. Типовые операции, логические функции и логические элементы в автоматических системах тепловых защит. Инверсия. Логическое усиление. Конъюнкция (функция И). Дизъюнкция (функция ИЛИ). Сопряжение логических элементов ТЗ с ТОУ.

Тема 3. Обеспечение надежности действия тепловых защит

Повреждения теплового оборудования вследствие аварий. Надежность ТЗ. Отказ (несрабатывание) или ложное действие системы ТЗ. Использование высоконадежных источников электрического питания. Рациональный выбор проектируемых систем ТЗ.

Тема 4. Тепловые защиты основного энергооборудования

Автоматические защиты барабанных котлов. Защита от повышения давления пара. Защита по уровню в барабане. Защита от потускнения и погасания факела. Защита от понижения температуры перегрева первичного пара. Автоматические защиты прямоточных паровых котлов. Защита от прекращения подачи воды. Защита от разрыва труб водяного экономайзера. Защита от повышения (понижения) давления пара перед встроенной задвижкой. Защита от увеличения частоты вращения ротора. Защита от ухудшения вакуума в конденсаторе. Защита от понижения давления масла в системе смазки и охлаждения подшипников.

Тема 5. Автоматическая защита вспомогательных установок

Защиты регенеративных ПВД. Защиты ПДУ. Защиты редукционно-охладительных установок. Защитные устройства мельничных систем паровых котлов.

Тема 6. Организация диагностики состояния оборудования и прогнозирования изменения технологических параметров

Прогнозирование чрезмерных отклонений важнейших параметров и перегрузки отдельных элементов автоматизированного технологического комплекса. Средства ручного диагноза. Прогнозирование множества параметров с помощью спорадического контроля. Предупреждение отказов в работе элементов системы управления. Диагноз состояния оборудования. Логические устройства диагностики. Организация автоматизированной системы управления технологическим процессом. ДСУ современных АСУ ТП. Задачи технической генетики (выявление и анализ неполадок и аварий ТОУ в прошлом) и прогностики (предсказание изменений технологических параметров и состояния оборудования через заданный отрезок времени в будущем), связанные с комплексом вычислительных и логических операций.

5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» 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;

– 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 логического управления и защиты энергооборудования, а также эффективных методов эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определен главной целью образовательной программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» и в целом по дисциплине составляет 50% аудиторных занятий. Занятия практического типа составляют 50% 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 «Технические средства защиты энергооборудования» (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 практическим заданиям.

Образцы тестовых заданий, заданий расчетных работ, 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-5	способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин на объектах теплоэнергетики и теплотехники

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-5 - способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин на объектах теплоэнергетики и теплотехники				
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: Методы проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: методы проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: методы проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ. 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: методы проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методы проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, свободно оперирует приобретенными знаниями.
уметь: Обеспечивать проведение типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и	Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет обеспечивать проведение типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных,	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: обеспечивать проведение типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: обеспечивать проведение типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: обеспечивать проведение типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического

пусковых работ	наладочных и пусковых работ	пусковых работ. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.
владеть: Методами проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методами проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ	Обучающийся владеет методами проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ 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 проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся в полном объеме владеет методами проведения типовых, плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, 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. Певзнер Л.Д. Теория систем управления [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва: Горная книга, 2002. — 472 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/3476.

2. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2015. — 624 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/68460.

3. Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.М. Лебедев, Б.И. Коновалов. — Электрон. дан. — Москва: ТУСУР, 2010. — 162 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/4947.

4. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления [Электронный

ресурс]: учеб. пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2016. — 224 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/71753.

5. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2016. — 464 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/71744.

б) дополнительная литература:

1. Пащенко Ф.Ф. Основы моделирования энергетических объектов [Электронный ресурс] / Ф.Ф. Пащенко, Г.А. Пикина. — Электрон. дан. — Москва: Физматлит, 2011. — 464 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/5284.

2. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике [Электронный ресурс]: учеб. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. — 352 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/72191.

3. Шидловский С.В. Автоматизация технологических процессов и производств [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва: ТУСУР, 2005. — 100 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/5442.

4. Трусов А.Н. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2010. — 200 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/6609.

5. Лаврищев И.Б. Применение САПР в автоматизации технологических процессов [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / И.Б. Лаврищев, А.Ю. Кириков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2009. — 8 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/40878.

6. Алтынбаев Р.Б. Теория технических систем и методы инженерного творчества в решении задач автоматизации технологических процессов: учебное пособие [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Р.Б. Алтынбаев, Л.В. Галина, Д.А. Проскурин. — Электрон. дан. — Оренбург: ОГУ, 2016. — 189 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/98008.

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://www.energosovet.ru;

http://www.RosTeplo.ru;

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: 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Теплоэнергетические установки, системы и комплексы». – М.: Изд-во Московского политеха, - 46 с.

10. Методические рекомендации для преподавателя

Преподавание дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» имеет своей целью ознакомить студентов с достижениями в области методов логического управления и защиты энергооборудования, добиться уяснения ими основных закономерностей этих методов, 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 бакалавров.

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 бакалавров при конспектировании лекционного материала.

Для освоения навыков поисковой и исследовательской деятельности бакалавр 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 бакалавров и конкретной темы.

Самостоятельная работа бакалавра 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 бакалаврами разных по форме и содержанию работ и заданий, связанных с практическим освоением содержания дисциплины. Бакалавры 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 бакалавров 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 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и профилю «Теплоэнергетические установки, системы и комплексы».

Авторы

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

Старший преподаватель
кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Е.А. Чугаев

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 Е.А. Чугаев

Приложение 1

Структура и содержание дисциплины «Логическое управление и защита энергооборудования» по направлению подготовки 13.03.01 «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
	Пятый семестр														
Тема 1	**Лекция.** Назначение автоматических защит	5	1	2			6								
	Семинарское занятие				2										
Тема 2	**Лекция.** Логические элементы защит	5	2	3			6								
	Семинарское занятие				3										
Тема 3	**Лекция.** Обеспечение надежности действия тепловых защит	5	3	3			6								
	Семинарское занятие				3							+			
Тема 4	**Лекция.** Тепловые защиты основного энергооборудования	5	4	4			6								
	Семинарское занятие				3										
	Выборочный приемочный и текущий контроль.				3								+		
Тема 5	**Лекция.** Автоматическая защита вспомогательных установок	5	5	3			6								
	Семинарское занятие				2							+			
Тема 6	**Лекция.** Организация диагностики состояния оборудования и прогнозирования изменения технологических параметров	5	6	3			6								
	Семинарское занятие				2										
	Форма аттестации	5	18												З
	Всего часов по дисциплине в пятом семестре			18	18		36								

Приложение 2

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Направление подготовки: 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
ОП (профиль): «Теплоэнергетические установки, системы и комплексы»
Форма обучения: очная

Кафедра: «Промышленная теплоэнергетика»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Логическое управление и защита энергооборудования»

Москва
2022

Таблица 1
к приложению 2

Паспорт фонда оценочных средств

Логическое управление и защита энергооборудования					
ФГОС ВО **13.03.01 Теплотехника и теплоэнергетика**					
КОМПЕТЕНЦИИ		**Перечень компонентов**	**Технология формирования**	**Форма оценочного средства**	**Степени уровней освоения компетенций**
ИНДЕКС	**ФОРМУЛИРОВКА**				
ОПК-5	способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин на объектах теплоэнергетики и теплотехники	**знать:** методы поиска, хранения, обработки и анализа информации из разных источников и баз данных; информационные, компьютерные и сетевые технологии **уметь:** осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из разных источников и баз данных; представлять информацию в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий **владеть:** методами поиска, хранения, обработки и анализа информации из разных источников и баз данных; информационными, компьютерными и сетевыми технологиями	Лекция, семинарские занятия, лабораторные занятия, решение ситуационных задач, СРС	Зачет, выполнение расчетной работы по индивидуальному заданию	Базовый уровень: способен участвовать в типовых, плановых испытаниях и ремонтах технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работах в стандартных производственных ситуациях Повышенный уровень: способен участвовать в типовых, плановых испытаниях и ремонтах технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работах в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом

Приложение 3

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

Перечень практических работ по дисциплине

1. Расчет переменных режимов эксплуатации котельных, паротурбинных установок и оборудования технологических энергосистем;
2. Определение влияния изменения параметров оборудования на экономичность и надежность энергосистем;
3. Способы оптимизации режимов работы энергооборудования;
4. Контроль изменения режимов работы энергооборудования;
5. Определение отклонения параметров работы от оптимальных значений, проведение регулировки;
6. Определить расход топливно-энергетических ресурсов и обосновать мероприятия по экономии энергоресурсов.

Приложение 4

Вопросы к зачету

1. Назначение автоматических защит.
2. Автоматические системы защиты теплового оборудования от повреждений.
3. Главные и локальные ТЗ.
4. Современные защитные устройства на ТЭС.
5. Логические элементы защит.
5. Составные управляющие и исполнительные элементы тепловых защит.
6. Типовые операции, логические функции и логические элементы в автоматических системах тепловых защит.
7. Инверсия.
8. Логическое усиление.
9. Конъюнкция (функция И).
10. Дизъюнкция (функция ИЛИ).
11. Сопряжение логических элементов ТЗ с ТОУ.
12. Обеспечение надежности действия тепловых защит.
13. Повреждения теплового оборудования вследствие аварий.
14. Надежность ТЗ.
15. Отказ (несрабатывание) или ложное действие системы ТЗ.
16. Использование высоконадежных источников электрического питания.
17. Рациональный выбор проектируемых систем ТЗ.
18. Тепловые защиты основного энергооборудования.
19. Автоматические защиты барабанных котлов.
20. Защита от повышения давления пара.
21. Защита по уровню в барабане.
22. Защита от потускнения и погасания факела.
23. Защита от понижения температуры перегрева первичного пара.
24. Автоматические защиты прямоточных паровых котлов.
25. Защита от прекращения подачи воды.
26. Защита от разрыва труб водяного экономайзера.
27. Защита от повышения (понижения) давления пара перед встроенной задвижкой.
28. Защита от увеличения частоты вращения ротора.
29. Защита от ухудшения вакуума в конденсаторе.
30. Защита от понижения давления масла в системе смазки и охлаждения подшипников.
31. Автоматическая защита вспомогательных установок.
32. Защиты регенеративных ПВД.
33. Защиты ПДУ.
34. Защиты редукционно-охладительных установок.
35. Защитные устройства мельничных систем паровых котлов.
36. Организация диагностики состояния оборудования и прогнозирования

изменения технологических параметров.

37. Прогнозирование чрезмерных отклонений важнейших параметров и перегрузки отдельных элементов автоматизированного технологического комплекса.

38. Средства ручного диагноза.

39. Прогнозирование множества параметров с помощью спорадического контроля.

40. Предупреждение отказов в работе элементов системы управления.

41. Диагноз состояния оборудования.

42. Логические устройства диагностики.

43. Организация автоматизированной системы управления технологическим процессом.

44. ДСУ современных АСУ ТП.

45. Задачи технической генетики (выявление и анализ неполадок и аварий ТОУ в прошлом) и прогностики (предсказание изменений технологических параметров и состояния оборудования через заданный отрезок времени в будущем), связанные с комплексом вычислительных и логических операций.

Приложение 5

Примеры задач для практических 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.

Рассчитаем режим работы блоков при температуре наружного воздуха, отличающейся от расчётной.

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].

Таблица 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 А 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 $t_{н.в.} = +15°C$, 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 NГТУ, её КПД $\eta_{ГТУ}$ и расхода уходящих газов $G_{ух}$ 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:

$$i = k^i_{\text{вх}} k^i_{\text{вых}} k^i_{\text{темп}} i_{\text{ISO}},$$

где: i – одна из величин Т4, $N_{\text{ГТУ}}$, $\eta_{\text{ГТУ}}$, Gух; $k^i_{\text{вх, вых, темп}}$ – поправки соответственно на $\Delta p_{\text{вх}}$, $\Delta p_{\text{вых}}$ и $t_{\text{н.в.}}$ (табл. 2).

Таблица 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
			$k^i_{\text{вх}}$	$k^i_{\text{вых}}$	$k^i_{\text{темп}}$		
T_4	°C	574	1,003	1,0065	0,969	556	568
	K	847				829	841
$N_{\text{ГТУ}}$	кВт	75 000	0,983	0,9875	1,091	79 429	75 716
$\eta_{\text{ГТУ}}$	–	0,359	0,993	0,9875	1,011	0,356	0,355
$G_{\text{ух}}$	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:

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

расход воздуха:

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

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

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

Энтальпии уходящих газов данного состава при стандартной температуре и T_4:

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

энтальпии воздуха при стандартной температуре и T_1

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

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

$$G_в\big(h_в(t_1) - h_в(t_{\text{ст}})\big) + G_{\text{топ}}(h_{\text{топ}}(p_{\text{топ}}, t_{\text{топ}}) - h_{\text{топ}}(p_{\text{ст}}, t_{\text{ст}}) + \eta_{\text{КС}} Q^p_н) =$$

$= G_{\text{ух}}\left(h_{\alpha_{\text{ух}}}(t_4) - h_{\alpha_{\text{ух}}}(t_{\text{ст}})\right) + N_{\text{э}}/(\eta_{\text{ЭГ}}\eta_{\text{ред}}\eta_{\text{мех}})$.

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

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

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

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

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

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 $p_д$ = 0,12 МПа ($t_д$ = 105°C, $h'_д$ = 439,3 кДж/кг, $h''_д$ = 2683,06 кДж/кг). Выпар из деаэратора осуществляется в количестве $g^{к}_{\text{вып}} = 0{,}0015$ от расхода конденсата $G_к$<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 $p_б$). Часть воды из барабана, равная $g^{\text{п}}_{\text{пр}} = 0{,}02$ 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:

$y_к = (h''|_{p\ к} - h_{к\ сух})(r|_{p\ к} + K_{вл}\eta_{oi\ сух}(h'' - h_{кт}))$,

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>;

$h_{к\ сух}$ – условная энтальпия влажного пара в конденсаторе, которая была бы там, если бы КПД процесса после достижения паром параметров насыщения (энтальпии h'') сохранялся на уровне $\eta_{oi\ сух.}$ Восполнение потерь рабочего тела в контуре осуществляется в приямок 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 $p_{i\text{вх}} = p_{i\text{вых}}/\left(1 - \overline{\Delta p_i}\right)$; 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 $Q_к = G_0 r_к x_к$:

$$t_к - t_{охл} = (t_{к0} - t_{охл0})\bar{Q}_к$$

(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:

$$p_0 = \frac{\sqrt{p_к^2 - \bar{G}_0^2 \bar{t}_0 \left(p'^2_{00} - p_{к0}^2\right)}}{1 - \delta p_{кл}}$$

(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

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

(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

$$\langle \Delta t \rangle_и = \frac{T_и^{вх} - T_и^{вых}}{\ln \frac{T_и^{вх} - t_б}{T_и^{вых} - t_б}}$$

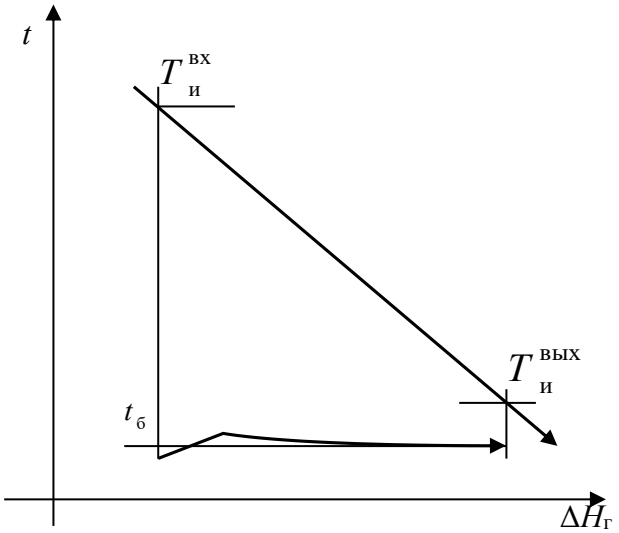


Рис. 1. *T-H* диаграмма испарителя

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

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

$$\Delta h_{ПН} = \frac{v_д + v_б}{2} \cdot \frac{p_б/(1 - \delta p_{эк}) - p_д}{\eta_{ПН}}$$

$$\Delta h_{ЦН} = v_б \frac{p_б \delta p_и}{\eta_{ПН}}$$

$$N_{цн,пн} = G_{ц,пв} \Delta h_{цн,пн}$$

Таблица 3

Параметры поверхностей теплообмена КУ

Элемент	Q_{i0}, кВт	k_{i0}, $\frac{Вт}{град.\cdot м^2}$	Δt_{i0}, град.	F_i, тыс. м²	k_i, $\frac{Вт}{град.\cdot м^2}$
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:

$$G_{\text{в,п}i}(h_i^{\text{вых}} - h_i^{\text{вх}}) \;=\; G_{\text{ух}}(I_i^{\text{вх}} - I_i^{\text{вых}}) + G_{\text{нас}}\Delta h_{\text{нас}}$$

и для деаэратора:

$$G_{\text{гп}}h_{\delta}'' + G_{к}h_{\text{гпк}}^{\text{вых}} \;=\; G_{\text{пв}}h_{\partial}' + G_{\text{вып}}h_{\partial}''$$

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:

$$Q_i \;=\; k_i F_i \frac{(T_i^{\text{вх}} - t_i^{\text{вых}}) - (T_i^{\text{вых}} - t_i^{\text{вх}})}{\ln \dfrac{T_i^{\text{вх}} - t_i^{\text{вых}}}{T_i^{\text{вых}} - t_i^{\text{вх}}}}$$

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

$$\left(\left| \begin{array}{c} Q_i \;=\; \dfrac{(T_i^{\text{вх}} - t_i^{\text{вх}})\left(E_г - E_{\text{п,в}}\right)}{E_г/W_г - E_{\text{п,в}}/W_{\text{п,в}}} \\ E_г = \exp(k_i F_i/W_г),\, E_{\text{п,в}} = \exp\left(k_i F_i/W_{\text{п,в}}\right) \\ W_г = Q_i/(T_i^{\text{вх}} - T_i^{\text{вых}}),\, W_{\text{п,в}} = Q_i/(t_i^{\text{вых}} - t_i^{\text{вх}}) \end{array} \right. \right)$$

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_iF_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:

$$Q_u = \frac{(T^{\text{вх}} - t_s)W_г}{1 - 1/E_г},\ Q_i = \frac{(T_i^{\text{вх}} - t_i^{\text{вых}})(E_{\text{п,в}}/E_г - 1)}{1/W_г - 1/W_{\text{п,в}}}$$

Расход греющего пара на деаэратор по отношению к расходу конденсата можно определить как

$$g_{\text{гп}}^{к} = \frac{G_{\text{гп}}}{G_к} = \frac{h_{\partial}^{} - h_{\text{гпк}}^{\text{вых}} + g_{\text{вып}}^{к}\left(h_{\partial}^{} - h_{\partial}^{}\right)}{h_{б}^{} - h_{\partial}^{}}$$

(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:

$$g_к = \frac{G_к}{G_0} = \frac{(1 + g_{\text{гп}})\left(1 + g_{\text{пр}}^{n}\right)}{1 - g_{\text{вып}}^{к}}$$

где: $g_{\text{гп}} = g_{\text{гп}}^{к} g_к$ – 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 $\delta t_{\text{нед}} = t_б - t_{\text{эк}}^{\text{вых}}$ 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.

Таблица 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	$g_{\text{гп}}$	–	$\dfrac{\left(g_{\text{гп}} - g_{\text{гп}}^{(и)}\right)}{g_{\text{гп}}} \le 0{,}0001$	$\dfrac{g_{\text{пв}}h'_{\partial} + g_{\text{вып}}h''_{\partial} - g_{к}h_{\text{гпк}}^{\text{вых}(}}{h''_{б}}$	17
	Недогрев в экономайзере до $t_б$	$\delta t_{\text{нед}}$	град.	$\left(\delta t_{\text{нед}} - \delta t'_{\text{нед}}\right) \le 0{,}05°$	$\left[\delta t'_{\text{нед}} = t_{б} - t_{\text{эк}}^{\text{вых}}\right] \quad f\left(\delta t_{\text{нед}},\right)$ $\left(\delta t'_{\text{нед}}, \delta t_{\text{нед}}^{(\text{ст})}, \delta t'^{(\text{ст})}_{\text{нед}}\right)$	
	Температура в конденсаторе	$t_{\text{к}}$	град.	$\left(t_{к} - t_{к}^{(и)}\right) \le 0{,}05°$	$t_{\text{охл}} + (t_{\text{к0}} - t_{\text{охл0}})\bar{Q}_{к}$	
2	Расход свежего пара	G_0	кг/с	$\left(1 - \dfrac{Q_{и}(\text{т/пер.})}{Q_{и}(\text{пар}) - Q_{\text{цн}}}\right) \le 5 \cdot 10^{-5}$	$G_0 \dfrac{Q_{и}\left(kF_{и}, G_{\text{ух}}, t_{б}, T_{и}^{\text{вх}}\right.}{(G_0 + G_{\text{гп}})\left(h''_{и} + g_{\text{пр}}h'_{и}\right.}$	48
3	Температура свежего пара	t_0	град.	$\left(1 - \dfrac{Q_{\text{пе}}(\text{т/пер})}{Q_{\text{пе}}(\text{пар})}\right) \le 2{,}5 \cdot 10^{-5}$	$t_{п}(p_0, h''_{б} + Q_{\text{пе}}/G_0)$	51

2.3. Проверка расчёта КПД ПГУ по обратному методу

КПД ПГУ при расчёте определялся по прямому методу:

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

Расчёт по обратному методу базируется на анализе потерь:

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

Потери энергии в ПГУ включают следующие компоненты:

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

$Q_{ух} = 2(G_{ух}I_{ух} - G_{в}I_{в-10} - G_{топ}h_{топ}) = 2\cdot(226{,}47\cdot472{,}98 - 222{,}02\cdot225{,}63 - 4{,}46\cdot1579{,}7) = 79\,083$ кДж/с;

– теплота, отводимая в конденсаторе:

$Q_{к}=2G_0(h_{к}–h_{к}') = 2\cdot28{,}57\cdot(2323{,}49 – 142{,}16) = 128\,093$ кДж/с;

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

$$2Q_{\text{пот ГТ}} = 2 \cdot \left(N_{\text{э ГТ}}\left(1/\left(\eta_{г}\eta_{м}\eta_{р}\right) - 1\right) + B_{\text{топ}}Q_i^r(1 - \eta_{\text{кс}})\right) =$$

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

– потери в генераторе и на трение в утилизационной установке:

$\Delta N_{пт} = N_г(1/(\eta_м\eta_г)–1) = 64540\cdot(1/(0{,}995\cdot0{,}985)–1) = 1303$ кДж/с;

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

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

$$\eta_{ПГУ} = 1 - \frac{79083+128093+4447+1303+1532}{2\cdot4{,}46\cdot50056} = 1 - \frac{214458}{446439} = 0{,}520,$$

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).

Таблица 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 *(pinch-point)*		°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%
" – " – " питательной воды		–	1,069	0,11%

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
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		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	7,0121	-0,39%
Энтропия пара за клапанами		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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 регулируемыми 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 $p_{\text{смв}} = p_{0\text{н}}$ и уравнений Стодолы для отсеков:

$$p_{\text{смв}} = \sqrt{p_к^2 - \overline{(G_{0\text{в}} + G_{0\text{н}})}^2 \bar{t}_{\text{см}0}\left(p'^2_{\text{см}0} - p^2_{\text{к}0}\right)},$$

$$p_{0\text{в}} = \frac{\sqrt{p^2_{\text{смв}} - \bar{G}^2_{0\text{в}} \bar{t}_{0\text{в}}\left(p'^2_{00} - p^2_{\text{смв}0}\right)}}{1 - \delta p_{\text{кл}}},$$

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 тепловосприятию 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

$$Q_{\text{а+б}} = G_{\text{ух}}\left(I^{\text{вх}}_{\text{а+б}} - I^{\text{вых}}_{\text{а+б}}\right), \quad I^{\text{вых}}_{\text{а+б}} = \left(I^{\text{вых}}_{a} G_{\text{г а}} + I^{\text{вых}}_{б} G_{\text{г б}}\right)/G_{\text{ух}}$$

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:

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

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

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

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

$$Q_{\text{р.т}} = 2\left(G_{\text{вып}}h''_{\partial} + g_{\text{пр}}(G_{0\text{в}}h'_{\text{бв}} + (G_{0\text{н}} + G_{\text{гп}})h'_{\text{бн}}) - G_{\text{дв}}h'_{к}\right)$$
$$= 2\cdot(0{,}05\cdot 2683{,}06 + \quad)$$

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

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

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

Таблица 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. м²	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

Таблица 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	$p_{0\text{в}}$	МПа	$\left(p_{0\text{в}} - p_{0\text{в}}^{(н)}\right) < 10\text{Па}$	по (2)	16
	Температура в конденсаторе	$t_{\text{к}}$	град.	$\left(t_{к} - t_{к}^{(н)}\right) \le 0{,}05°$	$t_{\text{охл}} + (t_{\text{к}0} - t_{\text{охл}0})\bar{Q}_{к}$	
2	Относительное давление смеси	$p_{\text{см}}/p_{0\text{в}}$	–	$\left(p_{\text{см}} - p_{\text{см}}^{(н)}\right) \le 1\text{Па}$	$p_{\text{см}}(\text{по (1)})/p_{0\text{в}}$	26
2	Расход свежего пара ВД	$G_{0\text{в}}$	кг/с	$\left(G_{0\text{в}} - G_{0\text{в}}(Q_{\text{ив}})\right) \le 10^{-5}\text{кг/с}$	$\frac{Q_{\text{ив}}\left(kF_{\text{ив}}, G_{\text{ух}}, t_{б}, T_{\text{ив}}^{\text{вх}}\right) + Q_{}}{h''_{\text{бв}} + g_{\text{пр}}h'_{\text{бв}} - \left(1+g_{\text{пр}}\right)/}$ / 2	82
3	Относительный расход свежего пара НД	$g_{0\text{н}}$	–	$\left(G_{0\text{н}} - g_{0\text{н}}^{(н)}G_{0\text{в}}\right) \le 10^{-4}\text{кг/с}$	$\frac{Q_{\text{ин}}\left(kF_{и}, G_{\text{ух}}, t_{б}, T_{и}^{\text{вх}}\right) + Q_{\text{}}}{h''_{\text{бн}} + g_{\text{пр}}h'_{\text{бн}} - \left(1+g_{\text{пр}}\right)/}$ / $G_{0\text{в}}$	56
4	Энтальпия на выходе из ГПК	$h_{\text{гпк}}^{\text{вых}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$		$\frac{h_{\text{гпк}}^{\text{вых}} + h'_{к} + Q_{\text{гпк}}(\text{т/о})/G_{к}}{2}$	63

				$\left(h_{\text{ГПК}}^{\text{вых}} - h'_{к} - Q_{\text{ГПК}}(\text{т/о})/G_{к}\right) \leq 0{,}01\text{кДж/кг}$		
5	Энтальпия на выходе из экономайзера ВД	$h_{\text{экв}}^{\text{вых}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\left(h_{\text{экв}}^{\text{вых}} - h_{\text{экв}}^{\text{вых}(н)}\right) \leq 0{,}01\text{кДж/кг}$	$h_{\text{экв1}}^{\text{вых}} + Q_{\text{экв2}}(\text{т/о})/G_{\text{пвв}}$	63
5	Тепловая мощность второй ступени экономайзера ВД	$Q_{\text{экв2}}$	$\frac{\text{кДж}}{с}$	$\left(Q_{\text{экв2}} - Q_{\text{экв2}}^{(н)}\right) \leq 0{,}01\frac{\text{кДж}}{с}$	$Q_{\text{экв2}}(kF_{\text{экв2}}, G_{\text{г экв2}}, G_{\text{пвв}},)$ $(t_{\text{экв1}}^{\text{вых}}, T_{\text{ив}}^{\text{вых}})$	63

Таблица 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%

Наименование величины	Обозначение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
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%
"–" 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		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	6,8683	-0,54%
Энтропия пара ВД за клапанами		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	6,8908	-0,54%
Давление пара НД за клапанами		МПа	0,156	3,92%
Энтропия свежего пара НД		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	7,8777	-0,30%
Энтропия пара НД за клапанами		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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%

Наименование величины	Обозна-чение	ЕИ	Значение	Расхождение с ном. режимом
Энтропия там же		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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%
Энтропия там же		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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		$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	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	$p_{\text{см}}/p_{0\text{в}}$	–	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 $4{,}4 - (-10) = 14{,}4°C$ приведены в следующей табл. 9.

Таблица 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	$N_{э\ пт}$	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 тепловосприятие 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 = const. растёт при снижении температуры перед компрессорами.

Приложение 6

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Работа вспомогательного оборудования котла и тепловой турбины в нормальных условиях, контроль за их работой, аварийное отключение, отказы в работе.

2. Загрязнение конденсатора. Способы очистки. Влияние загрязнений конденсатора на экономичность блока.

3. Аварийные режимы. Аварийные режимы котлов. Аварийные режимы турбин. Аварийные ситуации на вспомогательном оборудовании.

4. Плановые и аварийные остановы блоков. Расхолаживание оборудования. Схемы расхолаживания (под нагрузкой, низкопотенциальным паром, воздухом) и их эффективность.

5. Особенности получения и построения энергетических характеристик теплофикационного оборудования.

6. Аварийные режимы эксплуатации котлов. Технология и режим аварийного останова котлов.