

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце: **МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
ФИО: Максимов Алексей Борисович  
Должность: директор департамента по образовательной политике  
Дата подписания: 02.09.2023 16:18:14  
Уникальный программный ключ:  
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735c18b1d6

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)**

**УТВЕРЖДЕНО**  
Декан Факультета урбанистики и  
городского хозяйства

**К.И. Лушин**



2022г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**«Проектирование и эксплуатация высокотемпературных  
теплотехнологических установок»**

Направление подготовки  
**13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**

Профиль подготовки  
**Распределенная тепловая энергетика**

Квалификация (степень) выпускника  
**Магистр**

Форма обучения  
**Очная и заочная**

## 1. Цели освоения дисциплины

К **основным** целям освоения дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» следует отнести:

- формирование знаний о современных принципах, методах и средствах проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок;

- изучение способов повышения эффективности эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок, выработка навыков у студентов самостоятельно формулировать и решать задачи проектирования энергоустановок;

- подготовка студентов к деятельности в соответствии с квалификационной характеристикой магистра по направлению, в том числе формирование умений по выявлению необходимых усовершенствований и разработке новых, более эффективных методов проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок.

К **основным** задачам освоения дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» следует отнести:

- выработать навыки у студентов самостоятельно формулировать задачи проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок;

- научить мыслить системно на примерах решать задачи проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок с учетом технологических и экономических факторов;

- научить анализировать существующие принципы и методы проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок, разрабатывать и внедрять необходимые изменения с позиций повышения эффективности;

- дать информацию о новых направлениях и методах проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок в отечественной и зарубежной практике, развивать способности объективно оценивать их преимущества и недостатки;

- научить анализировать результаты моделирования проектных и рабочих ситуаций, производить поиск оптимизационного решения с помощью всевозможных методов.

## 2. Место дисциплины в структуре ООП магистратуры

Дисциплина «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» относится к числу профессиональных

учебных дисциплин вариативной части базового цикла основной образовательной программы магистратуры.

«Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами и практиками ООП:

- Управление технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике;
- Современные проблемы теплоэнергетики, теплотехники и теплотехнологий;
- Перспективные направления и энергосбережение в теплотехнологиях;
- Проектирование и эксплуатация теплоэнергетических установок;
- Использование вторичных энергоресурсов в промышленности.

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

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

Код компетенции	В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
ПК-3	способность к организации работ по эксплуатации тепломеханического оборудования	<p><b>знать:</b> Методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p> <p><b>уметь:</b> Обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов;</p> <p><b>владеть:</b> Методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p>

## 4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет **4** зачетные единицы, т.е. **144** академических часа (из них для очной 84 часа – самостоятельная работа студентов и для заочной 99 часа).

### **Третий семестр:**

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

**для заочной формы:** аудиторных занятий – 45 часов, форма контроля – экзамен.

Структура и содержание дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

### **Содержание разделов дисциплины**

#### **Третий семестр**

##### **Тема 1. Введение**

Вводные понятия и определения. Область применения ВТГУ. Энергетика теплотехнологии как научно-практическая основа технической реализации новых теплотехнологических процессов и энергетической модернизации, действующих теплотехнологических установок и систем. Проблемы высокотемпературной теплотехнологии.

##### **Тема 2. Классификация ВТУ**

Структурная схема ВТУ Классификация ВТУ по общности получаемого продукта, по использованным видам энергии, по термодинамическим параметрам. Теплотехнические классификации ВТУ. Принцип работы ВТГУ. Структурные схемы высокотемпературных теплотехнологических установок. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы.

##### **Тема 3. Тепловые и конструктивные схемы печей**

Конструктивные схемы работы печей: шахтных, конверторных, ваннных, электросталеплавильных. Тепловые характеристики печей: шахтных, конверторных, ваннных, электросталеплавильных.

##### **Тема 4. Тепловые и конструктивные схемы нагревательных печей**

Конструктивные схемы методических печей и нагревательных колодцев. Тепловые характеристики методических печей и нагревательных колодцев. Расчет пятizonной методической печи. Расчет камерной печи с постоянной температурой рабочего пространства.

##### **Тема 5. Тепловые и конструктивные схемы обжиговых печей**

Тепловые и конструктивные схемы агломерационных установок, трубчатых вращающихся и коксовых печей. Тепловые характеристики агломерационных установок, трубчатых вращающихся и коксовых печей. Расчет трубчатой вращающейся печи для обжига цементного клинкера.

**Тема 6. Материальные балансы высокотемпературных процессов и установок**

Структура уравнений и расчет материальных балансов ВТТУ: постановка задачи, математическая формулировка, методы решения. Определение погрешности расчета материального баланса.

#### **Тема 7. Тепловые балансы высокотемпературных процессов и установок**

Структура уравнений тепловых балансов ВТТУ. Удельные затраты топлива, коэффициент полезного использования теплоты топлива.

#### **Тема 8. Аэродинамические условия в рабочей камере ВТТУ**

Виды движения газов в рабочей камере. Движение газов в слое материала. Аэродинамика струи. Расчет сопротивления плотного слоя. Виды движения материалов в рабочей камере ВТУ.

#### **Тема 9. Режимы теплообмена в теплотехнологических установках**

Схемы внешнего теплообмена в рабочей камере. Знакомство с радиационным, конвективным и радиационно-конвективным режимами внешнего теплообмена. Методы расчета результирующего теплового потока на поверхностях, обрабатываемых тел.

#### **Тема 10. Продолжительность тепловой обработки материалов в рабочей камере высокотемпературных агрегатов**

Внутренний теплообмен в рабочей камере ВТУ. Продолжительность тепловой обработки термически тонких и толстых тел. Определение производительности высокотемпературных теплотехнологических установок. Регулирование процессов теплопередачи ВТТУ.

#### **Тема 11. Проектирование и эксплуатация высокотемпературных установок**

Стадии проектирования. Оптимизация проектных решений. Исходные данные для проектирования. Основные тенденции совершенствования высокотемпературных установок и их расчет при проектировании.

### **5. Образовательные технологии**

Методика преподавания дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» 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;

– организация и проведение текущего контроля знаний студентов в форме бланкового тестирования;

– проведение мастер-классов экспертов и специалистов по методам современного проектирования и 3D-моделирования высокотемпературных теплотехнологических установок, а также эффективных методов эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок.

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

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

Дисциплина	Ссылка
Проектирование и эксплуатация источников и систем теплоснабжения	<a href="https://online.mospolytech.ru/local/crw/course.php?id=4172">https://online.mospolytech.ru/local/crw/course.php?id=4172</a>

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 третьем семестре**

- подготовка и выступление на семинарском занятии с презентацией и обсуждением на тему «Современные методы проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок» (индивидуально для каждого обучающегося);

- решение ситуационных задач, анализ принятых проектных решений;
- тестирование.

Практические занятия посвящены выполнению расчетов по проектированию высокотемпературных теплотехнологических установок в объеме, предусматривающем реализацию теоретических и практических навыков, обучающихся по направлению.

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

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

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

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

**В результате освоения дисциплины (модуля) формируются следующие компетенции**

<b>Код компетенции</b>	<b>В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать</b>
ПК-3	способность к организации работ по эксплуатации тепломеханического оборудования

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).

<b>ПК-3 - способность к организации работ по эксплуатации тепломеханического оборудования</b>				
<b>Показатель</b>	<b>Критерии оценивания</b>			
	<b>Оценка «неудовлетворительно» или отсутствие сформированности компетенции</b>	<b>Оценка «удовлетворительно» или низкой уровень освоения компетенции</b>	<b>Оценка «хорошо» или повышенный уровень освоения компетенции</b>	<b>Оценка «отлично» или высокий уровень освоения компетенции</b>
<b>знать:</b> Методы обеспечения бесперебойной работы, правильной	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний:	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: методы	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методы

<p>эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p>	<p>методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования</p>	<p>обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.</p>	<p>знаний: методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.</p>	<p>обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, свободно оперирует приобретенными знаниями.</p>
<p><b>уметь:</b> 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</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</p>



		показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	повышенной сложности.
<b>владеть:</b> 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.

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 «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» (прошли промежуточный контроль, выполнили весь объем лабораторных работ, выступили с докладом на семинарском занятии)

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

Фонды оценочных средств представлены в приложениях к рабочей программе.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература:

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

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

3. Дзюзер В.Я. Теплотехника и тепловая работа печей: Учебное пособие [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 384 с.

**б) дополнительная литература:**

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

2. Машиностроение ядерной техники. Том IV-25. В двух книгах. Книга 1 [Электронный ресурс] / Е.О. Адамов [и др.]. — Электрон. дан. — Москва: Машиностроение, 2005. — 960 с.

3. Пояркова Е.В. Структурно-масштабные закономерности накопления повреждений высокотемпературного оборудования: монография [Электронный ресурс]: монография — Электрон. дан. — Москва: ФЛИНТА, 2016. — 121 с.

4. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2014. — 384 с.

5. Филимонов Ю.П. Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей. Методические указания [Электронный ресурс]: метод. указ. / Ю.П. Филимонов, К.С. Шатохин, С.Н. Шибалов. — Электрон. дан. — Москва: МИСИС, 2006. — 27 с.

**в) программное обеспечение и интернет-ресурсы:**

Программное обеспечение не предусмотрено.

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

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

Варианты контрольных заданий по дисциплине представлены на сайтах:

[Online.mospolytech.ru](http://Online.mospolytech.ru)

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://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**

1. Тимохин В.С. Методические указания по организации самостоятельной работы по дисциплине «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок». Направление подготовки: 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Распределенная тепловая энергетика»

## **10. Методические рекомендации для преподавателя**

Преподавание дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» имеет своей целью ознакомить студентов с достижениями в области проектирования и эксплуатации высокотемпературных теплотехнологических установок, добиться уяснения ими эффективных методов проектирования, моделирования и эксплуатации энергооборудования и энергосистем, порядка их применения, привить им практические навыки использования этих знаний к конкретным производственным ситуациям.

Преподавание дисциплины осуществляется в соответствии с ФГОС ВО.

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

*Средства обеспечения освоения дисциплины*

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие средства:

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

*Методические рекомендации по организации изучения дисциплины*

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

В качестве методики проведения практических занятий можно предложить:

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

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

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

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

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

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

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

также осуществляется через проведение ряда промежуточных тестирований. Итоговая аттестация по дисциплине предполагает устный зачет или экзамен, на которых проверяется усвоение материала, усвоение базовых понятий дисциплины.

Программа составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и профилю «Распределенная тепловая энергетика».

Автор

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

В.С. Тимохин

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

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

Л.А. Марюшин

Руководитель ООП

В.С. Тимохин

**Структура и содержание дисциплины «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных  
теплотехнологических установок»  
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	Тест	УО	Э	З	
	Первый семестр															
Тема 1	Лекция	3	1	1			7									
	Семинар	3	1		4											
Тема 2	Лекция	3	1	2			8									
	Семинар	3	1		3								+			
Тема 3	Лекция	3	2	2			8									
	Семинар	3	2		4											
Тема 4	Лекция	3	3	2			8									
	Семинар	3	3		4								+			
Тема 5	Лекция	3	4	2			8									
	Семинар	3	4		4											
Тема 6	Лекция	3	5	1			7									
	Семинар	3	5		3									+		
Тема 7	Лекция	3	6	2			8									
	Семинар	3	6		4											
Тема 8	Лекция	3	7	2			8									
	Семинар	3	7		4											
Тема 9	Лекция	3	8	2			8									
	Семинар	3	8		3									+		

Тема 10	Лекция	3	9	2			7								
	Семинар	3	9		4								+		
Тема 11	Лекция	3	9	2			7								
	Семинар	3	9		3										
	Форма аттестации	3	9												
	Всего часов по дисциплине в третьем семестре	144		20	40		84							+	



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

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

Кафедра: «Промышленная теплоэнергетика»

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Проектирование и эксплуатация высокотемпературных  
теплотехнологических установок»**

1. Паспорт фонда оценочных средств
2. Оценочные средства
3. Перечень практических работ
4. Вопросы для самопроверки
5. Вопросы к экзамену
6. Примеры задач для семинарских занятий

## 1. Паспорт фонда оценочных средств

<b>Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок</b>					
<b>ФГОС ВО 13.04.01 Теплотехника и теплоэнергетика</b>					
<b>КОМПЕТЕНЦИИ</b>		<b>Перечень компонентов</b>	<b>Технология формирования</b>	<b>Форма оценочного средства</b>	<b>Степени уровней освоения компетенций</b>
<b>ИНДЕКС</b>	<b>ФОРМУЛИРОВКА</b>				
ПК-3	способность к организации работ по эксплуатации тепломеханического оборудования	<p>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</p> <p>Уметь: обеспечивать соблюдение бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов</p> <p>Владеть: способами бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов</p>	Лекция, семинарские занятия, решение ситуационных задач, СРС	Экзамен, тестирование, решение ситуационных задач, устный опрос	<p>Базовый уровень: способен обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов в стандартных производственных ситуациях</p> <p>Повышенный уровень: способен обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов в нестандартных производственных ситуациях с их последующим анализом</p>

## 2. Оценочные средства

№ ОС	Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в ФОС
1	Устный опрос собеседование, (УО)	Средство контроля, организованное как специальная беседа педагогического работника с обучающимся на темы, связанные с изучаемой дисциплиной, и рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по определенному разделу, теме, проблеме и т.п.	Вопросы по темам/разделам дисциплины
2	Тест (Т)	Система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.	Фонд тестовых заданий
3	Разноуровневые задачи (РЗ)	Различают задачи и задания: а) репродуктивного уровня, позволяющие оценивать и диагностировать знание фактического материала (базовые понятия, алгоритмы, факты) и умение правильно использовать специальные термины и понятия, узнавание объектов изучения в рамках	Разноуровневые задачи

### **3. Перечень практических работ по дисциплине**

1. Материальные расчеты неравновесных теплотехнологических процессов;
2. Расчет камерной печи с постоянной температурой рабочего пространства;
3. Расчет статей теплового баланса;
4. Расчет тягодутьевого тракта печной установки высокотемпературных установок;
5. Методы расчета результирующего теплового потока на поверхностях обрабатываемых тел;
6. Использование аналитических решений краевых задач теплопроводности для определения продолжительности тепловой обработки термически массивных тел;
7. Расчет теплоизоляционных конструкций;
8. Проектирование обжиговых печей;
9. Определение параметров материального баланса печей;
10. Определение параметров эффективности высокотемпературной установки;
11. Выбор и анализ параметров оптимизации ВТПУ.

#### 4. Вопросы для самопроверки

1. Назначение промышленных печей;
2. Классификация промышленных печей;
3. Общая схема устройства печи;
4. Движение газов в слое материала;
5. Движение газов в каналах;
6. Расчет тягодутьевой установки;
7. Аэромеханические процессы в ВТПУ;
8. Виды движения материалов в рабочей камере ВТПУ;
9. Структура теплового баланса рабочей камеры;
10. Уравнение теплового баланса высокотемпературной теплотехнологической установки;
11. Вычисление статей приходной части теплового баланса печи;
12. Вычисление статей расходной части теплового баланса печи;
13. Тепло рассеянное в окружающей среде;
14. Диаграмма теплового баланса высокотемпературной теплотехнологической установки;
15. Уравнение материального баланса высокотемпературной теплотехнологической установки;
16. Структура уравнений материального баланса ВТТПУ;
17. Коэффициенты полезного действия высокотемпературной теплотехнологической установок;
18. Определение удельного расхода топлива;
19. Сложный теплообмен в печи;
20. Расчет конвективного теплообмена в печи;
21. Расчет лучистого теплообмена в печах;
22. Расчет сложного теплообмена;
23. Внешний теплообмен в рабочем пространстве печи;
24. Нагрев изделия в печи с постоянной температурой;
25. Нагрев изделий при изменении температуры внешней поверхности по закону  $t_{\text{пов.м}} = \theta \cdot \tau$ ;
26. Продолжительность тепловой обработки термически «массивных» тел;
27. Продолжительность тепловой обработки термически «тонких» тел;
28. Рекомендации по режимам нагрева металла;
29. Особенности внутреннего теплообмена в рабочей камере ВТПУ;
30. Плавильные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;
31. Шахтные плавильные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;
32. Доменные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;
33. Особенности теплообмена в доменных печах;
34. Ваннные плавильные печи, их конструкция, особенности

проектирования и эксплуатации;

35. Мартеновские печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

36. Конвертора, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

37. Электрические плавильные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

38. Нагревательные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

39. Методические печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

40. Камерные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

41. Трубчатые вращающиеся печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

42. Барабанные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

43. Коксовые печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

44. Нагревательные колодцы, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

45. Отражательные печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

46. Обжиговые печи, их конструкция, особенности проектирования и эксплуатации;

47. Стадии проектирования высокотемпературной теплотехнологической установки;

48. Исходные данные для проектирования высокотемпературной теплотехнологической установки;

49. Выбор теплотехнического оборудования при проектировании высокотемпературной теплотехнологической установки;

50. Регенераторы применяемые в высокотемпературных теплотехнологических установках;

51. Рекуператоры применяемые в высокотемпературных теплотехнологических установках;

52. Способы подготовки топлива;

53. Коксование углей;

54. Тенденции развития высокотемпературных процессов;

55. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы;

56. Определение потребности в энергоресурсах;

57. Классификация регенеративных подогревателей компонентов горения;

58. Автоматизация проектирования ВТПУ;

59. Структура математической модели ВТПУ и уровень ее сложности;

60. Модульный принцип построения модели ВТПУ;

61. Примеры математического моделирования ВТПУ;
62. Основы аппаратного оформления высокотемпературного процесса.

## 5. Вопросы к экзамену

1. ВТПУ: назначение, примеры конкретных установок. Процессы, протекающие в ВТПУ;
2. Принципы эффективной работы ВТПУ и проблемы их полной реализации;
3. Структурная схема ВТПУ и ее конструктивные элементы;
4. Проектирование и эксплуатация: сущность и отличия процессов;
5. Последовательность создания производственной ВТПУ;
6. Стадии проектирования: содержание, назначение и результат каждой стадии;
7. Экологические требования к ВТПУ и пути их реализации;
8. Характеристика вредных выбросов. Нормы ПДК и ПДВ;
9. Подбор и расчет оборудования ВТПУ;
10. ЕС ПКД при проектировании оборудования ВТПУ;
11. Оценка качественного уровня проектных решений;
12. Требования и нормы обеспечения жизнедеятельности;
13. Требования и нормы промышленной эстетики;
14. Жаростойкость и жаропрочность: понятия, пути их повышения. Причины разрушения металлических конструкций ВТПУ и методы их защиты;
15. Минеральные материалы: особенности макроструктур и свойств в различных агрегатных состояниях;
16. Огнеупор: физический смысл, способы определения и практическое значение;
17. Термостойкость: понятие, факторы влияния, пути ее повышения;
18. Шлакоустойчивость. Разрушение огнеупоров и влияние на него различных факторов;
19. Неформованные огнеупорные материалы и их назначение;
20. Основные и кислые огнеупоры. Особенности некоторых типов и групп;
21. Теплоизоляционные материалы: общие особенности, требования к ним, способы производства, признаки классификации;
22. Конструкционные и строительные материалы, используемые в ВТПУ и их особенности, области применения;
23. Классификация элементов ВТПУ;
24. Фундаменты и основания ВТПУ;
25. Каркасы ВТПУ: классификация, назначение и области применения;
26. Ограждения ВТПУ: классификация и общая характеристика, способы повышения их энергетической эффективности;
27. Конструкции основных частей ограждения. Своды;
28. Конструкции основных частей ограждения. Стены;
29. Конструкции основных частей ограждения. Поды;
30. Конструкции газоходов ВТПУ: классификация и общие



требования;

31. Трубопроводные коммуникации;
32. Механическая прочность конструктивных частей ограждений;
33. Тепловой расчет ограждений при стационарном режиме;
34. Температурные швы в ограждениях;
35. Расчет ограждений при нестационарном тепловом режиме;
36. Оптимизация ограждений;
37. Классификация высокотемпературных теплообменников;
38. Металлические рекуператоры: назначение, типы;
39. Керамические рекуператоры: назначение, типы;
40. Регенераторы: назначение, типы;
41. Рекомендации по выбору рационального регенеративного

устройства;

42. Основные понятия теории надежности;
43. Расчет надежности ВТПУ как системы элементов;
44. Основные причины аварий ВТПУ;
45. Пути повышения надежности ВТПУ;
46. Оптимизация надежности ВТПУ;
47. Способы размещения оборудования ВТПУ в цехе;
48. Характеристика производственных зданий;
49. Принципы эффективной компоновки ВТПУ;
50. Рациональная организация внутрицеховой транспортировки

материалов;

51. Характерные примеры компоновки ВТПУ;
52. Авторский надзор при сооружении ВТПУ;
53. Проведение пусконаладочных работ ВТПУ;
54. Приемочные и приемосдаточные испытания ВТПУ;
55. Задачи и организация эксплуатации ВТПУ;
56. Межремонтное обслуживание установок;
57. Эксплуатационные испытания ВТПУ;
58. Эксплуатационные характеристики ВТПУ и пути их

совершенствования;

59. Классификация и общая характеристика ремонтов ВТПУ;
60. Организация ремонтов;
61. Проведение холодных ремонтов ВТПУ;
62. Прогнозная оценка длительности межремонтной кампании

ВТПУ.

## 6. Примеры задач для семинарских занятий

**Задача 1:** Определить геометрические размеры футеровки и тепловые потери шахтной печи при следующих исходных данных: температура внутренней поверхности печи  $T_{\text{п}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температуры на границе кладок из диамитового и легковесного кирпичей на боковых стенках и днище составляют  $T_{\text{т.с}} \leq 650 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{т.д}} \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно; температура на границе между шамотной плитой крышки и шлаковатой  $T_{\text{т.к}} \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температуры на наружной поверхности стенок, днища и крышки составляют  $T_{\text{ст}} = T_{\text{д}} \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{к}} \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно; коэффициенты теплопроводности в ккал/(м·°С·ч) шлаковаты, шамотной плиты, диамитового и легковесного кирпичей определяются зависимостями  $\lambda_{\text{ш}} = 0,052 + 0,135 \cdot 10^{-3} t$ ,  $\lambda_{\text{л}} = 0,72 + 0,5 \cdot 10^{-3} t$ ,  $\lambda_{\text{дк}} = 0,125 + 0,27 \cdot 10^{-3} t$  и  $\lambda_{\text{пк}} = 0,25 + 0,22 \cdot 10^{-3} t$  соответственно; коэффициенты теплоотдачи в ккал/(м<sup>2</sup>·°С·ч) от боковых стен, днища и крышки равны  $\alpha_{\text{ст}} = \alpha_{\text{д}} = 10$  и  $\alpha_{\text{к}} = 9,1$  соответственно; температура окружающей среды  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Перевод в СИ:  $1 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{ч}) = 1,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

**Задача 2:** Расчет горения природного газа при заданных условиях.

Состав природного газа, %: 93,0 CH<sub>4</sub>; 1,2 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 0,7 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; 0,4 C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>; 0,2 C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>; 0,2 CO<sub>2</sub>; 3,3 N<sub>2</sub>; 1,0 H<sub>2</sub>O.

Решение:

1. Теплота сгорания газа:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{q_{\text{сн}_4} \text{CH}_4 + q_{\text{с}_2\text{н}_6} \text{C}_2\text{H}_6 + q_{\text{с}_3\text{н}_8} \text{C}_3\text{H}_8 + \dots}{100};$$

$$Q_{\text{ст}} = \frac{35\,818 \cdot 93,0 + 63\,748 \cdot 1,2 + 91\,255 \cdot 0,7 + 118\,646 \cdot 0,4 + 146\,077 \cdot 0,2}{100} = 35482 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

2. Теоретически необходимое количество сухого воздуха:

$$L_{\text{теор}} = \frac{0,264}{1000} 35482 + 0,02 = 9,39 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

При влагосодержании атмосферного воздуха  $d = 0,01 \text{ кг}/\text{кг}$ :

$$L_{\text{теор}}' = 1,016 \cdot 9,39 = 9,54 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

3. Действительное количество воздуха при коэффициенте расхода  $a = 1,2$ :

$$L_{\alpha} = 1,2 \cdot 9,54 = 11,45 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

4. Количество и состав продуктов сгорания при  $a = 1,2$ :

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12}) = 0,01(0,2 + 93,0 + 2 \cdot 1,2 + 3 \cdot 0,7 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,2) = 1,003 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6\text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{O} + 0,16 \cdot d \cdot L_{\alpha}) = 0,01(2 \cdot 93,0 + 3 \cdot 1,2 + 4 \cdot 0,7 + 5 \cdot 0,4 + 6 \cdot 0,2 + 1,0 + 0,16 \cdot 10 \cdot 11,27) = 2,146 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$\begin{aligned}
V_{N_2} &= 0,01 \cdot N_2 + 0,79 L_{\alpha} = \\
&= 0,01 \cdot 3,3 + 0,79 \cdot 11,3 = 8,953 \text{ м}^3/\text{м}^3; \\
V_{O_2} &= 0,21(\alpha - 1) L_{\text{теор}} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,39 = 0,384 \text{ м}^3/\text{м}^3; \\
V_{\alpha} &= 1,003 + 2,146 + 8,953 + 0,384 = \\
&= 12,486 \text{ м}^3/\text{м}^3 \approx 12,5 \text{ м}^3/\text{м}^3.
\end{aligned}$$

Процентный состав продуктов сгорания:

$$\begin{aligned}
CO_2 &= \frac{1,003 \cdot 100}{12,5} = 8,05 \% ; \\
H_2O &= \frac{2,146 \cdot 100}{12,5} = 17,2 \% ; \\
N_2 &= \frac{8,953 \cdot 100}{12,5} = 71,65 \% ; \\
O_2 &= \frac{0,384 \cdot 100}{12,5} = 3,1 \%.
\end{aligned}$$

### 5. Теоретическая температура горения.

Общее теплосодержание продуктов горения при подогреве воздуха до 800 С и  $\alpha = 1,2$ :

$$i_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{ж}}}{V_{\alpha}} + \frac{L'_{\alpha} L'_{\text{в}}}{V_{\alpha}}$$

По диаграмме  $(i-t)$  находим теплосодержание  $i'_{\text{в}}$  при 800 С:  $i'_{\text{в}} = 1109$  кДж/м<sup>3</sup>, тогда

$$i_{\text{общ}} = \frac{35482}{12,5} + \frac{11,45 \cdot 1109}{12,5} = 3854 \text{ кДж/м}^3.$$

С помощью уравнений для  $T_{\text{г}}$  и  $T_{\text{к}}$  при  $\alpha = 1,2$  вычисляем теоретическую температуру горения при  $\alpha = 1,2$ :  $t_{\text{теор}} = 2190$  С. Калориметрическая температура горения:  $t_{\text{к}} = 2313$  С.

### 6. Действительная температура печных газов при $h = 0,8$ :

$$T_{\text{д}} = 2313 \cdot 0,8 \approx 1850 \text{ С}.$$

### Задача 3: Расчет горения мазута при заданных условиях.

Горючая масса мазута имеет следующий состав, %: С<sup>г</sup> 87,4; Н<sup>г</sup> 11,2; О<sup>г</sup> 0,5; N<sup>г</sup> 0,4; S<sup>г</sup> 0,5. Золы A<sup>п</sup> = 0,2 %, содержание влаги W<sup>п</sup> = 3,0 %. Принимаем  $\alpha = 1,2$ . Воздух поступает без подогрева.

#### Решение:

#### 1. Состав рабочего топлива:

$$C^{\text{п}} = C^{\text{г}} \frac{100 - (A^{\text{п}} + W^{\text{п}})}{100} = 87,4 \cdot 0,968 = 84,6 \% ;$$

$$H^{\text{п}} = H^{\text{г}} \frac{100 - (A^{\text{п}} + W^{\text{п}})}{100} = 11,2 \cdot 0,968 = 10,8 \%$$

Остальные составляющие остаются без изменения в пределах точности анализа. Получаем состав рабочего топлива, %: С<sup>п</sup> 84,6; Н<sup>п</sup> 10,8; О<sup>п</sup> 0,5; N<sup>п</sup> 0,4; S<sup>п</sup> 0,5; A<sup>п</sup> 0,2; W<sup>п</sup> 3,0.

#### 2. Теплота сгорания мазута:

$$Q_{\text{ж}} = 339C + 1256H + 109(S - O) - 25(9H + W) =$$

$$= 339 \cdot 84,6 + 1256 \cdot 10,8 + 109(0,5 - 0,5) -$$

$$- 25(9 \cdot 10,8 + 3,0) = 39739 \text{ кДж/кг.}$$

3. Теоретически необходимое для горения количество сухого воздуха:

$$L_{\text{теор}} = 0,0889C^P + 0,265H^P - 0,0333(S^P - O^P) =$$

$$= 0,0889 \cdot 84,6 + 0,265 \cdot 10,8 = 10,40 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Количество атмосферного воздуха при влагосодержании  $d = 0,01$  кг/кг:

$$L_{\text{теор}}' = 1,016 \cdot 10,40 = 10,57 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

4. Действительное количество воздуха при  $\alpha = 1,2$ :

$$L_{\alpha}' = 10,57 \cdot 1,2 = 12,68 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

5. Количество и состав продуктов полного сгорания при  $\alpha = 1,2$ :

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01855 \cdot C^P = 0,01855 \cdot 84,6 = 1,569 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^P = 0,007 \cdot 0,5 = 0,0035 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,112H^P + 0,0124W^P + 0,0016 \cdot d \cdot L_{\alpha}' =$$

$$= 0,112 \cdot 10,8 + 0,0124 \cdot 3,0 +$$

$$+ 0,0016 \cdot 10 \cdot 12,48 = 1,447 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_{\alpha}' + 0,008 \cdot N^P = 0,79 \cdot 12,48 +$$

$$+ 0,008 \cdot 0,4 = 9,862 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)L_{\text{теор}} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 10,40 = 0,437 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Состав продуктов сгорания:

$$\text{RO}_2 = \frac{1,573 \cdot 100}{13,32} = 11,8\% ;$$

$$\text{O}_2 = \frac{0,437 \cdot 100}{13,32} = 3,3\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{1,447 \cdot 100}{13,32} = 10,8\% ;$$

$$\text{N}_2 = \frac{9,862 \cdot 100}{13,32} = 74,1\%.$$

6. Теоретическая температура горения. Общая энтальпия продуктов сгорания без подогрева воздуха и топлива:

$$i_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{ж}}^P}{V_{\alpha}'} = \frac{39739}{13,32} = 2983 \text{ кДж/м}^3.$$

По диаграмме ( $i-t$ ) при  $\alpha = 1,2$  находим теоретическую температуру горения:  $t_{\text{теор}} = 1818$  °С.

7. Действительную температуру горения при  $h_{\Gamma} = 0,8$  находим по диаграмме ( $i-t$ ) при

$$i_{\text{общ}}' = i_{\text{общ}} \cdot \eta_{\Gamma} = 2983 \cdot 0,8 = 2386 \text{ кДж/м}^3;$$

$$T_{\text{д}} \gg 1500 \text{ °С.}$$

**Задача 4:** Расчет удельного сопротивления технологических зон печей производства технического кремния.

Для теоретической оценки удельного сопротивления технологических зон кремниевых печей принимаем следующую упрощенную схему строения реакционного пространства:

1. Зона твердофазных процессов (все компоненты шихты твердые,

температура монотонно повышается по высоте зоны от 600 до 1873 К);

2. Зона плавления (начинается размягчение минеральной части шихты, заканчивающееся полным плавлением при 2073 К);

3. Зона гетерогенного расплава (плотнупакованный углеродистый слой, погруженный в вязкий расплав кремнезема. Температура по мере заглубления возрастает, достигая 2373 К на границе газовой полости);

4. Гарнисаж (уплотненная шихта исходного состава, покрытая коркой SiC);

5. Газовая полость (зона дуговых процессов);

6. Подовая настывль (вязкая шлакокарбидная пористая масса с полостями, заполненными металлическим кремнием).

Шихта составляется из четырех основных компонентов: кварцит, древесный уголь, нефтяной кокс, газовый уголь. Состав шихты и средний размер частиц компонентов шихты, поступающих на колошник печи, показаны в табл. 1.

Вследствие протекания восстановительных реакций размер частиц восстановителя по мере опускания шихты монотонно уменьшается от начального до нуля, поэтому значение эффективного диаметра частиц углеродистых материалов принимаем равным половине среднего диаметра частиц, поступающих на колошник.

Температура реакционной среды кремниевой печи меняется в широких пределах (от 600 К на поверхности колошника до 2300 К на стенке газовой полости в торце электрода).

Таблица 1 - Состав шихты для плавки технического кремния

Компонент шихты	Средний диаметр частиц $d$ , мм		Дозировка, кг/т	Массовая доля в шихте, %	Плотность кажущаяся, кг/м <sup>3</sup>	Объемная доля в шихте $j_i$ , %
	исходный	на входе в печь				
Кварцит	30	27	2540	59,9	2650	16,8
Древесный уголь	40	26	1310	30,9	300	76,4
Нефтяной кокс	8	8	150	3,5	1000	2,6
Газовый уголь	15	15	240	5,7	1000	4,2

Расчет УЭС шихты кремниевой печи (зона твердофазных процессов).

Исходные данные:

- температура  $T = 1473$  К;

эффективные диаметры частиц компонентов шихты:

- кварцит  $d_1 = 0,027$  м;

- древесный уголь  $d_2 = 0,013$  м;

- нефтяной кокс  $d_3 = 0,004$  м;

- газовый уголь  $d_4 = 0,008$  м.

Значения коэффициентов А, В, С для кварцита и газового угля считаем равными соответствующим коэффициентам для кокса.

Расчет:

Параметр	Формулы	Результат
Удельная проводимость, Ом · м <sup>-1</sup> :		
Засыпки кварцита, $c_1$	$\chi_1 = \frac{\chi_1^k}{A + \frac{d_1}{B + Cd_1^2}} = \frac{\frac{1}{(6 \cdot 10^2)}}{136 + \frac{0,027}{2 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 0,027^2}}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$
Засыпки древесного угля, $c_2$	$\chi_2 = \frac{\chi_2^k}{A + \frac{d_2}{B + Cd_2^2}} = \frac{\frac{1}{(4 \cdot 10^4)}}{29 + \frac{0,013}{2 \cdot 10^{-5} + 17 \cdot 0,013^2}}$	74,6
Засыпки нефтяного кокса, $c_3$	$\chi_3 = \frac{\chi_3^k}{A + \frac{d_3}{B + Cd_3^2}} = \frac{\frac{1}{(1,25 \cdot 10^4)}}{136 + \frac{0,004}{2 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 0,004^2}}$	53,9
Засыпки газового угля, $c_4$	$\chi_4 = \frac{\chi_4^k}{A + \frac{d_4}{B + Cd_4^2}} = \frac{\frac{1}{(1,25 \cdot 10^4)}}{136 + \frac{0,008}{2 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 0,008^2}}$	56,2
Смеси, $c_5$	$\sum_{i=1}^4 \frac{\chi_i - \chi_\Sigma}{\chi_i + 2\chi_\Sigma} \varphi_i = 0$ (решение методом итераций)	50
Удельное электрическое сопротивление шихты, г, Ом · м	$\rho_\Sigma = \frac{1}{\chi_\Sigma} = \frac{1}{50}$	0,02