Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Максимов Алексей Борисович
Должность: директор департамента по образовательной политике
Дата подписания: 18.09.2025 17:19:39
Уникальный программный ключ:
8db180d1a3f02ac9e60521a5672742735a0852a

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

Факультет урбанистики и городского хозяйства

УТВЕРЖДАЮ

Декан

_____/К.И. Лушин/

27 февраля 2025 года

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок»

Направление подготовки
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль
Распределенная тепловая энергетика

Квалификация
Магистр

Формы обучения
Очная и заочная

Москва, 2025 г.

Разработчик(и):

Профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», д.т.н., профессор _____ / С.Д. Корнеев /
И.О. Фамилия

Согласовано:

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», к.т.н., доцент _____ / Л.А. Марюшин /
И.О. Фамилия

Содержание

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине 4
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы 5
3. Структура и содержание дисциплины 5
   - 3.1. Виды учебной работы и трудоемкость 5
   - 3.2. Тематический план изучения дисциплины 5
   - 3.3. Содержание дисциплины 7
   - 3.4. Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий 8
4. Учебно-методическое и информационное обеспечение 8
   - 4.1. Нормативные документы и ГОСТы 8
   - 4.2. Основная литература 8
   - 4.3. Дополнительная литература 8
   - 4.4. Электронные образовательные ресурсы 9
   - 4.5. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение 9
   - 4.6. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы 10
5. Материально-техническое обеспечение 10
6. Методические рекомендации 10
   - 6.1. Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения 10
   - 6.2. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины 11
7. Фонд оценочных средств 12
   - 7.1. Методы контроля и оценивания результатов обучения 12
   - 7.2. Шкала и критерии оценивания результатов обучения 12
   - 7.3. Оценочные средства 13

1. Цели, задачи и планируемые результаты обучения по дисциплине

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.

В результате освоения образовательной программы обучающийся должен:

– знать методы обеспечения бесперебойной работы, правильной эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и тепло технологического оборудования;

– уметь обеспечивать бесперебойную работу, правильную эксплуатацию, ремонт и модернизацию энергетического оборудования, средств автоматизации и защиты, электрических и тепловых сетей, воздухопроводов и газопроводов;

– владеть методами эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования

Обучение по дисциплине «Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок» направлено на формирование у обучающихся следующих компетенций:

Код и наименование компетенций	Индикаторы достижения компетенции
ПК-3 Способность к организации работ по эксплуатации тепломеханического оборудования	ИПК-3.1. Способен эксплуатировать энергетическое и тепломеханического оборудования. ИПК-3.2. Способен ремонтировать энергетическое и тепломеханического оборудования. ИПК-3.3. Способен модернизировать энергетическое и тепломеханического оборудования.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к части, формируемая участниками образовательных отношений блока Б1 «Дисциплины (модули)».

«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. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет по очной форме обучения **4** зачетные единицы (144 часов), по заочной форме обучения **4** зачетные единицы (144 часов).

3.1 Виды учебной работы и трудоемкость
(по формам обучения)

3.1.1. Очная форма обучения

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры
			3
1	**Аудиторные занятия**	**40**	40
	В том числе:		
1.1	Лекции	**10**	10
1.2	Семинарские/практические занятия	**30**	30
1.3	Лабораторные занятия	**-**	-
2	**Самостоятельная работа**	**104**	104
3	**Промежуточная аттестация**		
	Зачет/диф.зачет/экзамен	**экзамен**	экзамен
	Итого	**144**	144

3.1.2. Заочная форма обучения

№ п/п	Вид учебной работы	Количество часов	Семестры	
			3	
1	**Аудиторные занятия**	**40**	40	
	В том числе:			
1.1	Лекции	**10**	10	
1.2	Семинарские/практические занятия	**30**	30	
1.3	Лабораторные занятия	**-**	-	
2	**Самостоятельная работа**	**104**	104	
3	**Промежуточная аттестация**			
	Зачет/диф.зачет/экзамен	**экзамен**	экзамен	
	Итого	**144**	144	

3.2 Тематический план изучения дисциплины
(по формам обучения)

3.2.1. Очная форма обучения

№ п/п	Разделы/темы дисциплины	Трудоемкость, час					
		Всего	Аудиторная работа				Самостоятельная работа
			Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Практическая подготовка	
1	Тема 1. Высокотемпературные теплотехнологические установки.	**15**	1	3	-	-	11
2	Тема 2. Организация проектирования ВТУ.	**15**	1	3	-	-	11
3	Тема 3. Конструкционные материалы ВТУ.	**15**	1	3	-	-	11
4	Тема 4. Основные элементы ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
5	Тема 5. Высокотемпературные теплообменники.	**15**	1	3	-	-	11
6	Тема 6. Расчет и оптимизация надежности ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
7	Тема 7. Компоновка конструктивных элементов и размещение ВТУ в цехе.	**14**	1	3	-	-	10
8	Тема 8. Пуск и наладка ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
9	Тема 9. Эксплуатация ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
10	Тема 10. Организация и проведение ремонтов ВТУ.	**14**	1	3	-		10
	Итого	**144**	**10**	**30**	**-**	**-**	**104**

3.2.2. Заочная форма обучения

№ п/п	Разделы/темы дисциплины	Трудоемкость, час					
		Всего	Аудиторная работа				Самостоятельная работа
			Лекции	Семинарские/ практические занятия	Лабораторные занятия	Практическая подготовка	
1	Тема 1. Высокотемпературные теплотехнологические установки.	**15**	1	3	-	-	11
2	Тема 2. Организация проектирования ВТУ.	**15**	1	3	-	-	11
3	Тема 3. Конструкционные материалы ВТУ.	**15**	1	3	-	-	11
4	Тема 4. Основные элементы ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
5	Тема 5. Высокотемпературные теплообменники.	**15**	1	3	-	-	11
6	Тема 6. Расчет и оптимизация надежности ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10

7	Тема 7. Компоновка конструктивных элементов и размещение ВТУ в цехе.	**14**	1	3	-	-	10
8	Тема 8. Пуск и наладка ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
9	Тема 9. Эксплуатация ВТУ.	**14**	1	3	-	-	10
10	Тема 10. Организация и проведение ремонтов ВТУ.	**14**	1	3	-		10
	Итого	**144**	**10**	**30**	**-**	**-**	**104**

3.3 Содержание дисциплины

Тема 1. Высокотемпературные теплотехнологические установки.

Вводные понятия и определения. Классификация ВТУ. Структурные схемы теплотехнологических реакторов и агрегатов. Источники энергии в теплотехнологии. Тепловые схемы теплотехнологических агрегатов. Теплотехнические принципы организации теплотехнологических процессов.

Тема 2. Организация проектирования ВТУ.

Исходные данные для проектирования. Выбор и расчет оборудования ВТУ. Использование единой системы проектно-конструкторской документации при проектировании ВТУ. Экономическая эффективность природоохранных мероприятий. Требования обеспечения жизнедеятельности и промышленной эстетики к ВТУ. Оценка качества проектных решений.

Тема 3. Конструкционные материалы ВТУ.

Роль стойкости конструкционных материалов. Металлические конструкционные материалы. Общие свойства и особенности минеральных материалов. Огнеупорные материалы и изделия. Методика подбора стойкого рабочего огнеупора. Теплоизоляционные материалы. Строительные материалы. Новые конструкционные и строительные материалы.

Тема 4. Основные элементы ВТУ.

Классификация элементов ВТУ. Фундаменты и основания. Каркасы. Ограждения. Конструкции других узлов рабочей камеры. Газоходы. Трубопроводные коммуникации.

Тема 5. Высокотемпературные теплообменники.

Классификация и общая характеристика. Металлические рекуператоры. Керамические рекуператоры. Регенераторы. Рекомендации по выбору рационального регенеративного устройства.

Тема 6. Расчет и оптимизация надежности ВТУ.

Основные понятия теории надежности. Расчет надежности ВТУ как системы элементов. Основные причины аварий ВТУ. Пути повышения надежности ВТУ. Расчет надежности ВТУ при дублировании отдельных ее элементов. Оптимизация надежности ВТУ.

Тема 7. Компоновка конструктивных элементов и размещение ВТУ в цехе.

Постановка задачи. Способы размещения оборудования в цехе. Характеристика производственных зданий. Критерии оценки качества компоновки. Принципы эффективной компоновки ВТУ. Исходные данные и разработка компоновки. Рациональная организация внутрицеховой транспортировки материалов. Характерные примеры компоновки ВТУ.

Тема 8. Пуск и наладка ВТУ.

Авторский надзор при сооружении ВТУ. Пусконаладочные работы. Сушка и разогрев ВТУ после сооружения или холодного ремонта. График разогрева. Приемочные и приемосдаточные испытания.

Тема 9. Эксплуатация ВТУ.

Задачи и организация эксплуатации. Межремонтное обслуживание. Служба футеровки. Эксплуатационные испытания. Эксплуатационные характеристики ВТУ и пути их совершенствования.

Тема 10. Организация и проведение ремонтов ВТУ.

Классификация и общая характеристика ремонтов ВТУ. Организация ремонтов. Проведение холодных ремонтов. Значение ремонтов в хозяйственной деятельности предприятия. Прогнозная оценка длительности межремонтной кампании.

3.4 Тематика семинарских/практических и лабораторных занятий

Семинарские/практические занятия

Тема 1. Высокотемпературные теплотехнологические установки.
Тема 2. Организация проектирования ВТУ.
Тема 3. Конструкционные материалы ВТУ.
Тема 4. Основные элементы ВТУ.
Тема 5. Высокотемпературные теплообменники.
Тема 6. Расчет и оптимизация надежности ВТУ.
Тема 7. Компоновка конструктивных элементов и размещение ВТУ в цехе.
Тема 8. Пуск и наладка ВТУ.
Тема 9. Эксплуатация ВТУ.
Тема 10. Организация и проведение ремонтов ВТУ.

4. Учебно-методическое и информационное обеспечение

4.1 Нормативные документы и ГОСТы

1. ГОСТ 34518-2019. Печи промышленные и агрегаты тепловые.
2. ГОСТ Р 53682-2009. Установки нагревательные для нефтеперерабатывающих заводов.
3. ГОСТ 23762-79. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые для повышенных температур и давлений.
4. ГОСТ Р 53321-2009. Аппараты теплогенерирующие, работающие на различных видах топлива. Требования пожарной безопасности.

4.2 Основная литература

1. Троянкин Ю.В. Проектирование и эксплуатация высокотемпературных технологических установок : учеб. пособие для вузов / Троянкин Ю. В. — М. : Изд-во МЭИ, 2002. — 320 с. : ил.
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. Моисеев Б.В. Промышленная теплоэнергетика [Электронный ресурс]: учеб. / Б.В. Моисеев, Ю.Д. Земенков, С.Ю. Торопов. — Электрон. дан. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. — 236 с.
4. Дзюзер В.Я. Теплотехника и тепловая работа печей: Учебное пособие [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2017. — 384 с.

4.3 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.

4.4 Электронные образовательные ресурсы

Проведение занятий и аттестаций возможно в дистанционном формате с применением системы дистанционного обучения университета (СДО-LMS) на основе разработанных кафедрой электронных образовательных ресурсов (ЭОР) по всем разделам программы:

Название ЭОР	Ссылка
Проектирование и эксплуатация высокотемпературных теплотехнологических установок	https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=8332

Разработанный ЭОР включает в себя: лекционный и практический материал; самостоятельную работу; видеоматериалы; промежуточный и итоговый тесты.

Порядок проведения работ в дистанционном формате устанавливается отдельными распоряжениями проректора по учебной работе и/или центром учебно-методической работы.

Каждый студент обеспечен индивидуальным неограниченным доступом к электронным библиотекам университета *(*http://lib.mami.ru/lib/content/elektronnyy-katalog*)*.

Ссылка на электронную библиотеку:
https://online.mospolytech.ru/course/view.php?id=7621&section=1

4.5 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение

1. МойОфис – российская компания-разработчик безопасных офисных решений для общения и совместной работы с документами (Альтернатива MS Office) https://myoffice.ru/
2. Платформа nanoCAD – это российская платформа для проектирования и моделирования объектов различной сложности. Поддержка форматов *.dwg и IFC делает ее отличным решением для совмещения САПР- и BIM-технологий. Функционал платформы может быть расширен с помощью специальных модулей https://www.nanocad.ru/support/education/
3. Система трехмерного моделирования «КОМПАС-3D» https://edu.ascon.ru/main/download/freeware/

4. VALTEC.PRG.3.1.3. Программа для теплотехнических и гидравлических расчетов https://valtec.ru/document/calculate/
5. Онлайн расчеты АВОК-СОФТ https://soft.abok.ru/help_desk/

4.6 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1. Российская национальная библиотека http://www.nlr.ru
2. ЭБС «Университетская библиотека онлайн» https://biblioclub.ru/index.php
3. Научная электронная библиотека http://www.elibrary.ru
4. Российская государственная библиотека http://www.rsl.ru
5. Образовательная платформа ЮРАЙТ http://www.urait.ru
6. «Техэксперт» – справочная система, предоставляющая нормативно-техническую, нормативно-правовую информацию https://техэксперт.сайт/
7. НП «АВОК» – помощник инженера по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике https://www.abok.ru/
8. Е-ДОСЬЕ – Электронный эколог. Независимая информация о российских организациях, база нормативных документов и законодательных актов https://e-ecolog.ru/
9. Инженерная сантехника VALTEC (каталог продукции и нормативная документация) https://valtec.ru/

5. Материально-техническое обеспечение

Для проведения лекционных занятий используются аудитории, оснащенные компьютерами, интерактивными досками, мультимедийными проекторами и экранами: АВ2404, АВ2415 и аудитории общего фонда. Для проведения семинарских и лабораторных работ используются аудитории: АВ2406, АВ1101 и аудитории корпуса УРБАН.ТЕХНОГРАД Инновационно-образовательном комплексе «Техноград», который расположен на территории ВДНХ.

6. Методические рекомендации

6.1 Методические рекомендации для преподавателя по организации обучения

6.1.1 Преподаватель организует преподавание дисциплины в соответствии с требованиями «Положения об организации образовательного процесса в Московском политехническом университете и его филиалах», утверждённым ректором университета.

6.1.2 На первом занятии преподаватель доводит до сведения студентов содержание рабочей программы дисциплины (РПД).

6.1.3 Преподаватель особенно обращает внимание студентов на:

- виды и формы проведения занятий по дисциплине, включая порядок проведения занятий с применением технологий дистанционного обучения и системы дистанционного обучения университета (СДО Московского Политеха);
- виды, содержание и порядок проведения текущего контроля успеваемости в соответствии с фондом оценочных средств;

– форму, содержание и порядок проведения промежуточной аттестации в соответствии с фондом оценочных средств, предусмотренным РПД.

6.1.4 Преподаватель доводит до сведения студентов график выполнения учебных работ, предусмотренных РПД.

6.1.5 Преподаватель рекомендует студентам основную и дополнительную литературу.

6.1.6 Преподаватель предоставляет перед промежуточной аттестацией (экзаменом или зачётом) список вопросов для подготовки.

6.1.7 Преподаватели, которые проводят лекционные и практические (семинарские) занятия, согласуют тематический план практических занятий, чтобы использовать единую систему обозначений, терминов, основных понятий дисциплины.

6.1.8 При подготовке к семинарскому занятию по перечню объявленных тем преподавателю необходимо уточнить план их проведения, согласно РПД, продумать формулировки и содержание учебных вопросов, выносимых на обсуждение, ознакомиться с перечнем вопросов по теме семинара.

В ходе семинара во вступительном слове раскрыть практическую значимость темы семинарского занятия, определить порядок его проведения, время на обсуждение каждого учебного вопроса. Использовать фронтальный опрос давая возможность выступить всем студентам, присутствующим на занятии.

В заключительной части семинарского занятия следует подвести итоги: дать оценку выступлений каждого студента и учебной группы в целом. Раскрыть положительные стороны и недостатки проведенного семинарского занятия. Ответить на вопросы студентов. Выдать задания для самостоятельной работы по подготовке к следующему занятию.

6.1.9 Целесообразно в ходе защиты рефератов, лабораторных работ, курсовых работ и проектов задавать выступающим и аудитории дополнительные и уточняющие вопросы с целью выяснения их позиций по существу обсуждаемых проблем.

Возможно проведение занятий и аттестаций в дистанционном формате с применением системы дистанционного обучения университета (СДО Московского Политеха).

6.1.10 Порядок проведения работ в дистанционном формате устанавливается отдельными распоряжениями проректора по учебной работе и/или центром учебно-методической работы.

6.2 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

6.2.1 Студенту необходимо составить для себя график выполнения учебных работ, предусмотренных РПД с учётом требований других дисциплин, изучаемых в текущем семестре.

6.2.2 При проведении занятий и процедур текущей и промежуточной аттестации с использованием инструментов информационной образовательной среды дистанционного образования университета (СДО Московского Политеха), как во время контактной работы с преподавателем, так и во время самостоятельной работы студент должен обеспечить техническую возможность дистанционного подключения к системам дистанционного обучения. При отсутствии такой возможности обсудить ситуацию с преподавателем дисциплины.

6.2.3 К промежуточной аттестации допускаются только обучающиеся, выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные рабочей программой дисциплины (РПД).

7. Фонд оценочных средств

7.1 Методы контроля и оценивания результатов обучения

Контроль успеваемости и качества подготовки проводится в соответствии с требованиями "Положения об организации образовательного процесса в Московском политехническом университете".

Для контроля успеваемости и качества освоения дисциплины настоящей программой предусмотрены следующие виды контроля:

– контроль текущей успеваемости (текущий контроль);

– промежуточная аттестация.

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 докладом и обсуждением;

– тест, экзамен.

Оценочные средства текущего контроля успеваемости включают контрольные вопросы и задания в форме электронного тестирования, для контроля освоения обучающимися разделов дисциплины – решение задач.

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

7.2 Шкала и критерии оценивания результатов обучения

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

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».

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	Выполнены все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом. Студент демонстрирует неполное, правильное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах

	показателей, либо если при этом были допущены 2-3 несущественные ошибки.
Удовлетворительно	Выполнены все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом. Студент демонстрирует соответствие знаний, в котором освещена основная, наиболее важная часть материала, но при этом допущена одна значительная ошибка или неточность.
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.

7.3 Оценочные средства

7.3.1. Текущий контроль

Для проведения текущего контроля применяются следующие формы: разноуровневые задачи и задания; доклад, сообщение; устный опрос, собеседование; тест.

7.3.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация проводится на соответствующих формам обучения семестрах в форме экзамена.

Экзамен проводится по билетам, ответы предоставляются письменно с последующим устным собеседованием. Билеты формируются из вопросов представленного ниже перечня. В билет включается два вопроса из разных разделов дисциплины и одно практическое задание. Перечень вопросов соответствует темам, изученным на лекционных и семинарских занятиях (прилагается). Время на подготовку письменных ответов – до 40 мин, устное собеседование – до 10 минут.

7.3.3. Вопросы для экзамена

1. ВТУ: назначение, примеры конкретных установок. Процессы, протекающие в ВТУ;
2. Принципы эффективной работы ВТУ и проблемы их полной реализации;
3. Структурная схема ВТУ и ее конструктивные элементы;
4. Проектирование и эксплуатация: сущность и отличия процессов;
5. Последовательность создания производственной ВТУ;
6. Стадии проектирования: содержание, назначение и результат каждой стадии;
7. Экологические требования к ВТУ и пути их реализации;
8. Характеристика вредных выбросов. Нормы ПДК и ПДВ;
9. Подбор и расчет оборудования ВТУ;
10. ЕС ПКД при проектировании оборудования ВТУ;
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 ВТУ 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 ВТУ и их особенности, области применения;

23. Классификация элементов ВТУ;

24. Фундаменты и основания ВТУ;

25. Каркасы ВТУ: классификация, назначение и области применения;

26. Ограждения ВТУ: 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 ВТУ: 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 ВТУ как системы элементов;

44. Основные причины аварий ВТУ;

45. Пути повышения надежности ВТУ;

46. Оптимизация надежности ВТУ;

47. Способы размещения оборудования ВТУ в цехе;

48. Характеристика производственных зданий;

49. Принципы эффективной компоновки ВТУ;

50. Рациональная организация внутрицеховой транспортировки материалов;

51. Характерные примеры компоновки ВТУ;

52. Авторский надзор при сооружении ВТУ;

53. Проведение пусконаладочных работ ВТУ;

54. Приемочные и приемосдаточные испытания ВТУ;

55. Задачи и организация эксплуатация ВТУ;

56. Межремонтное обслуживание установок;

57. Эксплуатационные испытания ВТУ;

58. Эксплуатационные характеристики ВТУ и пути их совершенствования;

59. Классификация и общая характеристика ремонтов ВТУ;

60. Организация ремонтов;

61. Проведение холодных ремонтов ВТУ;
62. Прогнозная оценка длительности межремонтной кампании ВТУ.

Приложение 1

Перечень практических работ:

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 ВТУ.

Приложение 2

Вопросы для самопроверки

1. Основные определения и понятия теплотехнологии.
2. Классификация ВТУ. Источник энергии в ВТУ.
3. Структурные схемы теплотехнологических реакторов, схемы размещения источников энергии и перемещения рабочих тел и теплоносителей.
4. Тепловые схемы теплотехнологических агрегатов: классификация, примеры.
5. Теплотехнические принципы организации теплотехнологических процессов.
6. Система показателей совершенства теплотехнических принципов и конструктивных схем ВТУ.
7. Принципиально-конструктивные схемы камер ВТУ.
8. «Инновационная цепочка» и ее составляющие.
9. Роль НИР и ОКР в формировании исходных данных для проектирования объекта.
10. Стадии проектирования: содержание, назначение, результат каждой из них.
11. Назначение патентного поиска на каждой стадии проектирования.
12. Экологические требования к ВТУ и пути их реализации. Нормы ПДК и ПДВ.
13. Подбор и расчет оборудования ВТУ.
14. Назначение ЕС ПКД при проектировании ВТУ и нацеленность основных документов.
15. Оценка качественного уровня проектных решений.
16. Требования и нормы обеспечения жизнедеятельности и промышленной эстетики.
17. Жаростойкость и жаропрочность металлов, пути их повышения. Причины разрушения металлических конструкций ВТУ и методы защиты.
18. Особенности макроструктуры и свойств минеральных материалов.
19. Физический смысл, способ определения и практическое значение огнеупорности.
20. Понятие термостойкости, условия возникновения термических напряжений в огнеупорных изделиях. Факторы, влияющие на термостойкость и пути ее повышения.
21. Понятие шлакоустойчивости. Физическое представление процесса разрушения огнеупоров и влияние на него различных факторов.
22. Пути повышения шлакоустойчивости. Примеры наиболее шлакоустойчивых огнеупоров для различных условий.
23. Виды неформованных огнеупорных материалов и их назначение.

24. Особенности некоторых типов и групп кислых огнеупоров.

25. Особенности некоторых типов и групп основных огнеупоров.

26. Характерные особенности средних огнеупоров.

27. Особенности теплоизоляционных материалов, требования к ним, способы производства, признаки классификации.

28. Отличи легковесов от эффективных теплоизоляционных материалов. Способы производства легковесов, классификация, применение.

29. Строительные материалы, используемые для ВТУ, их особенности и области применения.

30. Новые конструкционные и строительные материалы, их особенности и области применения.

31. Условия для применения той или иной конструкции фундамента.

32. Общие требования к каркасам, способы их реализации. Рамный жесткий и регулируемый каркасы.

33. Общие требования к ограждениям ВТУ и возможности их практической реализации.

34. Качество и категории кладки. Способы связывания штучных изделий в конструкции ограждения.

35. Энергетическая эффективность ограждений и пути ее повышения. Экономическая эффективность разных видов ограждения.

36. Стоимость, надежность и эксплуатационные характеристики сводов разных конструкций.

37. Особенности конструкции подов в нагревательных и плавильных печах, способы выполнения температурных швов и обеспечения герметичности и применяемых огнеупорах для них.

38. Классификация газоходов. Оптимальные форма, поперечное сечение и длина газохода.

39. Воздействия, испытываемые технологическими трубопроводами. Подвески и опоры трубопроводов.

40. Устройства для компенсации температурных удлинений трубопроводов. Детали технологических трубопроводов.

41. Требования к тепловой изоляции трубопроводов и ее конструктивные части.

42. Классификация регенеративных элементов ВТУ.

43. Виды регенераторов и области их применения.

44. Понятие надежности. Смысл и количественное выражение ее характеристик.

45. Классификация отказов. Смысл параметров потока отказов и его изменение во времени.

46. Предельное состояние объекта и его количественная оценка.

47. Ремонтопригодность и ее количественные показатели.

48. Основные положения расчета надежности ВТУ как системы конструктивных элементов.

49. Авария, ее причины и последствия.

50. Направления повышения надежности ВТУ. Классификация способов структурного резервирования.

51. Критерии и факторы оптимизации надежности ВТУ. Исходная формула целевой функции.

52. Пути оптимизации надежности ВТУ.

53. Различия в компоновке оборудования при проектировании новой ВТУ и реконструкции действующей.

54. Способы размещения оборудования в цехе, их достоинства и недостатки.

55. Критерии оценки качества компоновки ВТУ.

56. Принципы эффективной компоновки ВТУ.

57. Организация грузовых потоков в цехе.

58. Требования к соединительным коммуникациям при компоновке оборудования ВТУ.

59. Требования к взаимному расположению конструктивных элементов при компоновке ВТУ.

60. Назначение площадок обслуживания ВТУ, требования к ним и их устройство.

61. Назначение, организация и проведение авторского надзора.

62. Цель и содержание пусконаладочных работ.

63. График сушки и разогрева ВТУ после холодного ремонта и контроль за его выполнением.

64. Факторы, определяющие режим разогрева ВТУ.

65. Последовательность разогрева установки из холодного состояния.

66. Назначение, порядок и особенности проведения приемочных и приемосдаточных испытаний ВТУ.

67. Организация и основные задачи эксплуатации ВТУ.

68. Понятие межремонтное обслуживание ВТУ.

69. Классификация рабочих камер ВТУ по условиям службы футеровки.

70. Различия условий службы огнеупоров в своде и поду ванны печей.

71. Механизм разрушения динасового и периклазохромитового сводов сталеплавильных печей.

72. Влияние дополнительной тепловой изоляции свода на его стойкость.

73. Роль паров минеральных материалов в износе футеровки рабочей камеры ВТУ.

74. Причины износа и способы обеспечения высокой стойкости и надежной работы ПОГФ.

75. Механизм разрушения средне- и низкотемпературных участков шахты доменной печи. Пути устранения этих разрушающих процессов.

76. Условия эффективной эксплуатации ВТУ.

77. Отличия эксплуатационных испытаний ВТУ от приемочных. Цели, задачи и периодичность эксплуатационных испытаний.

78. Признаки классификации ремонтов ВТУ. Общая характеристика ремонтов.

79. Роль ремонтов ВТУ в хозяйственной деятельности предприятий в настоящее время и в перспективе.

80. Категории текущих ремонтов и их особенности.

81. Отличия текущих ремонтов ВТУ от капитальных.

82. Система планово-предупредительных ремонтов: назначение, основные особенности.

83. Совокупность мероприятий, позволяющих ускорить ремонт ВТУ и повысить его качество.

84. Сетевой график ремонта: назначение и содержание.

85. Методы прогноза длительности рабочей кампании ВТУ.

Приложение 3

Примеры задач для семинарских занятий

Задача 1:

Определить геометрические размеры футеровки и тепловые потери шахтной печи при следующих исходных данных: температура внутренней поверхности печи $T_{п}$ =1000 0С; температуры на границе кладок из диамитового и легковесного кирпичей на боковых стенках и днище составляют $T_{г.с} \leq$650 0С и $T_{г.д} \leq$500 0С соответственно; температура на границе между шамотной плитой крышки и шлаковатой $T_{г.к} \leq$800 0С; температуры на наружной поверхности стенок, днища и крышки составляют $T_{ст} = T_{д} \leq$50 0С и $T_{к} \leq$30 0С соответственно;

коэффициенты теплопроводности в ккал/(м·0С·ч) шлаковаты, шамотной плиты, диатомитового и легковесного кирпичей определяются зависимостями $\lambda_ш = 0,052 + 0,135 \cdot 10^{-3} t$, $\lambda_п = 0,72 + +0,5 \cdot 10^{-3} t$, $\lambda_{дк} = 0,125 + 0,27 \cdot 10^{-3} t$ и $\lambda_{пк} = 0,25 + 0,22 \cdot 10^{-3} t$ соответственно; коэффициенты теплоотдачи в ккал/(м2·0С·ч) от боковых стен, днища и крышки равны $\alpha_{ст} = \alpha_д = 10$ и $\alpha_к = 9,1$ соответственно; температура окружающей среды Т = 20 0С.

Перевод в СИ: 1 ккал/(м·0С·ч) = 1,16 Вт/(м·К).

Задача 2: Расчет горения природного газа при заданных условиях.

Состав природного газа, %: 93,0 CH_4; 1,2 C_2H_6; 0,7 C_3H_8; 0,4 C_4H_{10}; 0,2 C_5H_{12}; 0,2 CO_2; 3,3 N_2; 1,0 H_2O.

Решение:

1. Теплота сгорания газа:

$$Q_н = \frac{q_{CH_4} CH_4 + q_{C_2H_6} C_2H_6 + q_{C_4H_{10}} C_3H_8 + \ldots}{100};$$

$$Q_н = \frac{35\,818 \cdot 93,0 + 63\,748 \cdot 1,2 + 91\,255 \cdot 0,7}{100} +$$

$$+ \frac{118\,646 \cdot 0,4 + 146\,077 \cdot 0,2}{100} = 35482 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Теоретически необходимое количество сухого воздуха:

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

При влагосодержании атмосферного воздуха *d* = 0,01 кг/кг:

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

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

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

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

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 +$$

$$+4C_4H_{10} + 5C_2H_{12}) = 0,01(0,2 + 93,0 + 2 \cdot 1,2 +$$

$$+3 \cdot 0,7 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,2) = 1,003 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{H_2O} = 0,01(2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_6H_{12} +$$

$$+H_2O + 0,16 \cdot d \cdot L_α) = 0,01(2 \cdot 93,0 + 3 \cdot 1,2 + 4 \cdot 0,7 +$$

$$+5 \cdot 0,4 + 6 \cdot 0,2 + 1,0 + 0,16 \cdot 10 \cdot 11,27) = 2,146 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot N_2 + 0,79 L_α =$$

$$= 0,01 \cdot 3,3 + 0,79 \cdot 11,3 = 8,953 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) L_{теор} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,39 = 0,384 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_α = 1,003 + 2,146 + 8,953 + 0,384 =$$

$$= 12,486 \text{ м}^3/\text{м}^3 \approx 12,5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Процентный состав продуктов сгорания:

$$CO_2 = \frac{1,003 \cdot 100}{12,5} = 8,05\%;$$

$$H_2O = \frac{2,146 \cdot 100}{12,5} = 17,2\%;$$

$$N_2 = \frac{8,953 \cdot 100}{12,5} = 71,65\%;$$

$$O_2 = \frac{0,384 \cdot 100}{12,5} = 3,1\%.$$

5. Теоретическая температура горения.

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

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

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

$$i_{\text{общ}} = \frac{35\,482}{12,5} + \frac{11,45 \cdot 1109}{12,5} = 3854 \text{ кДж/м}^3.$$

С помощью уравнений для $T_{\text{т}}$ и $T_{\text{к}}$ при = 1,2 вычисляем теоретическую температуру горения при а = = 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, %: $C^{\text{г}}$ 87,4; $H^{\text{г}}$ 11,2; $O^{\text{г}}$ 0,5; $N^{\text{г}}$ 0,4; $S^{\text{г}}$ 0,5. Золы $A^{\text{р}}$ = 0,2 %, содержание влаги $W^{\text{р}}$ = 3,0 %. Принимаем а = 1,2. Воздух поступает без подогрева.

Решение:

1. Состав рабочего топлива:

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

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

Остальные составляющие остаются без изменения в пределах точности анализа. Получаем состав рабочего топлива, %: $C^{\text{р}}$ 84,6; $H^{\text{р}}$ 10,8; $O^{\text{р}}$ 0,5; $N^{\text{р}}$ 0,4; $S^{\text{р}}$ 0,5; $A^{\text{р}}$ 0,2; $W^{\text{р}}$ 3,0.

2. Теплота сгорания мазута:

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

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

$$-25(9 \cdot 10,8 + 3,0) = 39\,739 \text{ кДж/кг}.$$

3. Теоретически необходимое для горения количество сухого воздуха:

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

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

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 а = 1,2:

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

5. Количество и состав продуктов полного сгорания при а = 1,2:

$$V_{CO_2} = 0,01855 \cdot C^{\text{р}} = 0,01855 \cdot 84,6 = 1,569 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^{\text{р}} = 0,007 \cdot 0,5 = 0,0035 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{H_2O} = 0,112H^{\text{р}} + 0,0124W^{\text{р}} + 0,0016 \cdot d \cdot L_{\alpha} =$$

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

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

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot L_{\beta} + 0,008 \cdot N^{\text{р}} = 0,79 \cdot 12,48 +$$

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

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_{\text{теор}} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 10,40 = 0,437 \text{м}^3/\text{кг}.$$

Состав продуктов сгорания:

$$RO_2 = \frac{1,573 \cdot 100}{13,32} = 11,8\,\%$$

;

$$O_2 = \frac{0,437 \cdot 100}{13,32} = 3,3\,\%$$
$$H_2O = \frac{1,447 \cdot 100}{13,32} = 10,8\,\%$$
$$N_2 = \frac{9,862 \cdot 100}{13,32} = 74,1\%.$$

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

$$i_{общ} = \frac{Q_н^р}{V_\alpha} = \frac{39739}{13,32} = 2983 \text{ кДж/м}^3.$$

По диаграмме (*i*–*t*) при а = 1,2 находим теоретическую температуру горения: $t_{теор}$ = 1818 °С.

7. Действительную температуру горения при $h_г$ = 0,8 находим по диаграмме (*i*–*t*) при

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

$T_д$ » 1500 °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 (плотноупакованный 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 настыль (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^3	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 A, B, C для кварцита и газового угля считаем равными соответствующим коэффициентам для кокса.

Расчет:

Параметр	Формулы	Результат
Удельная проводимость, Ом · м$^{-1}$:		
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_S	$\sum_{i=1}^{4} \frac{\chi_i - \chi_\Sigma}{\chi_i + 2\chi_\Sigma} \varphi_i = 0$ (решение методом итераций)	50
Удельное электрическое сопротивление шихты, r, Ом · м	$\rho_\Sigma = \frac{1}{\chi_\Sigma} = \frac{1}{50}$	0,02