

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Документ подписан проставлен электронной подписью
Информация о владельце: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
ФИО: Крюков Вадим Николаевич высшего образования
Должность: Проректор по образовательной деятельности и инновационной политике
«Запорожский государственный университет им. Н.М. Федоровского»
Дата подписания: 25.06.2026 10:53:30 (ЗГУ)
Уникальный программный ключ:
1b0adb7fd710f6a0705d90c58682bd0c5f2f25b2

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по Од и МП
_____ Крюков В.Н.

ТЕОРИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Теория пирометаллургических процессов

рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой **Металлургии, машин и оборудования**
Учебный план 22.03.02_бак_очн_ТМ-2026.plx
Направление подготовки: **Металлургия**

бакалавр

Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **5 ЗЕТ**

Часов по учебному плану 180
в том числе:
аудиторные занятия 48
самостоятельная работа 114
Часы на контроль 18

Виды контроля в семестрах: зачет с оценкой 6

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	6 (3.2)			
	Неделя 16			
Вид занятий	уп	рп	уп	рп
Лекции	16	16	16	16
Лабораторные	16	16	16	16
Практические	16	16	16	16
Итого ауд.	48	48	48	48
Контактная работа	48	48	48	48
Сам. работа	114	114	114	114
Часы на контроль	18	18	18	18
Итого	180	180	180	180

Программу составил(и):

к.с-х.н. Доцент Носова Ольга Васильевна _____

Рабочая программа дисциплины

разработана в соответствии с ФГОС:

Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования - бакалавриат по направлению подготовки 22.03.02 Металлургия (приказ Минобрнауки России от 02.06.2020 г. № 702)

Рабочая программа одобрена на заседании кафедры

Протокол от 10.06.2026г. № 11

Срок действия программы: 2026-2030 уч.г.

И.о. зав. кафедрой к.т.н., доцент Лаговская Е.В.

Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году

к.т.н., доцент _____ 2027 г.

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2027-2028 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 2027 г. № ____
Зав. кафедрой**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

к.т.н., доцент _____ 2028 г.

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2028-2029 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 2028 г. № ____
Зав. кафедрой**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

к.т.н., доцент _____ 2029 г.

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2029-2030 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 2029 г. № ____
Зав. кафедрой**Визирование РПД для исполнения в очередном учебном году**

к.т.н., доцент _____ 2030 г.

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для исполнения в 2030-2031 учебном году на заседании кафедры

Протокол от _____ 2030 г. № ____
Зав. кафедрой

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (РП-1)

(Изменение: цели стали конкретными, измеримыми и сфокусированными на физико-химических закономерностях современных пирометаллургических переделов)

1.1. Цель дисциплины: Формирование у обучающихся системных фундаментальных знаний о термодинамических и кинетических закономерностях высокотемпературных металлургических процессов, а также практических навыков термодинамического моделирования, расчета материальных балансов и обоснования оптимальных режимов работы пирометаллургических агрегатов при переработке сульфидного и окисленного сырья цветных металлов.

1.2. Основные задачи дисциплины:

- Изучить методы построения и анализа фазовых диаграмм многокомпонентных систем, применяемых в металлургии меди, никеля, свинца и цинка.
- Освоить теорию активности компонентов в металлургических расплавах (шлаках, штейнах, металлах) и ее влияние на направление и глубину протекания химических реакций.
- Проанализировать кинетику гетерогенных процессов: обжига, плавки во взвешенном состоянии (флэш-плавка), плавки в ванне расплава и конвертирования.
- Научиться рассчитывать материальные и тепловые балансы пирометаллургических процессов с использованием современных программных продуктов.
- Сформировать понимание механизмов потерь цветных металлов со шлаками и методов их минимизации, а также основ рафинирования металлов пирометаллургическими методами.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП (РП-2)

(Изменение: логически выверены пререквизиты и постреквизиты, устранены ошибки предыдущих версий)

Цикл (раздел) ООП: Б1.В (Вариативная часть)

2.1. Требования к предварительной подготовке обучающегося: Студент должен владеть знаниями и навыками, полученными при изучении дисциплин: «Физическая химия», «Кристаллохимия», «Металлургическая теплотехника», «Металлургия меди и никеля», «Обогащение руд цветных металлов».

2.2. Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее:

- Теория гидрометаллургических процессов
 - Переработка техногенных ресурсов
 - Проектирование металлургических цехов
 - Производственная (технологическая) практика
 - Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы (ВКР)
-

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ

ПК-2.1: Анализирует качество технологического процесса и качества продукции по результатам аналитического контроля.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

3.1. Знать:

- Законы химической термодинамики, применяемые для расчета равновесий в системах металл-шлак-газ.
- Методы построения и чтения диаграмм состояния (Т-х, Т-р, диаграммы Эллингема) для многокомпонентных металлургических систем.
- Модели растворов (регулярные, субрегулярные, модель квазихимических взаимодействий) для расчета активностей компонентов в шлаках и штейнах.
- Кинетические закономерности гетерогенных реакций: диффузия в пограничных слоях, химическая кинетика на поверхности раздела фаз, механизмы массопереноса.

3.2. Уметь:

- Проводить термодинамический анализ возможности протекания металлургических реакций при заданных температурах и парциальных давлениях газов.
- Рассчитывать материальные балансы плавки и конвертирования с учетом фактического состава сырья и флюсов.
- Анализировать причины потерь цветных металлов со шлаками (механические, химические, физико-химические) и предлагать технологические решения по их снижению.
- Использовать справочную литературу и базы данных термодинамических свойств веществ.

3.3. Владеть:

- Навыками термодинамического моделирования металлургических процессов (базовое владение ПО типа FactSage, HSC Chemistry или специализированными калькуляторами).
- Методикой экспериментального определения фазового состава шлаков и штейнов.
- Методами оптимизации технологических режимов пирометаллургических агрегатов на основе физико-химических расчетов.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

(Изменение: содержание логически перегруппировано в 4 модуля, добавлены современные прогрессивные технологии, сбалансированы виды занятий)

Раздел 1. Термодинамические и кинетические основы пирометаллургии

- **Тема 1.1.** Химическая термодинамика металлургических процессов. Энергия Гиббса, константа равновесия, изотерма химической реакции. Диаграммы Эллингема и их применение для выбора восстановителей и оценки устойчивости соединений.

- **Тема 1.2.** Фазовые равновесия в металлургических системах. Правило фаз Гиббса. Построение и анализ диаграмм состояния бинарных и тройных систем (Me-S-O, Me-Fe-S). Политермические сечения и проекции ликвидуса.
- **Тема 1.3.** Растворы в металлургических расплавах. Активность и коэффициент активности. Модели шлаковых расплавов (теория ионных расплавов, модель квазихимических взаимодействий). Расчет активностей компонентов в реальных промышленных шлаках.
- **Тема 1.4.** Кинетика гетерогенных металлургических процессов. Стадийность процессов. Диффузия в газовой фазе, жидких шлаках и твердых продуктах реакции. Уравнения скорости для реакций газ-твердое тело и газ-жидкость.

Раздел 2. Теория окислительных пирометаллургических процессов

- **Тема 2.1.** Термодинамика и кинетика окислительного обжига сульфидных концентратов. Условия образования сульфатов и оксидов. Влияние температуры и парциального давления SO₂ и O₂ на состав продуктового обжига.
- **Тема 2.2.** Теория автогенной плавки во взвешенном состоянии (флэш-плавка). Тепловой баланс процесса, роль тепла экзотермических реакций окисления сульфидов. Кинетика сгорания сульфидной пыли в факеле.
- **Тема 2.3.** Теория конвертирования штейнов. Последовательность окисления сульфидов железа, никеля и меди. Термодинамические условия образования конверторных шлаков и причины разбрызгивания.

Раздел 3. Теория восстановительных процессов и плавки на штейн

- **Тема 3.1.** Термодинамика восстановительной плавки. Восстановление оксидов углеродом и твердым углеродом. Условия образования карбидов и карбонатов.
- **Тема 3.2.** Теория плавки на штейн (матовая плавка). Распределение цветных металлов (Cu, Ni, Co) и благородных металлов между штейном, шлаком и газовой фазой. Влияние состава шихты и температуры на степень извлечения.
- **Тема 3.3.** Пирометаллургическая переработка техногенного сырья. Термодинамические особенности плавки медных и никелевых концентратов с высоким содержанием магния и кальция.

Раздел 4. Теория рафинирования и металлургические расплавы

- **Тема 4.1.** Физико-химические свойства металлургических расплавов. Плотность, вязкость, поверхностное натяжение и электропроводность шлаков и штейнов. Их влияние на разделение фаз и осаждение капель металла в шлаке.
- **Тема 4.2.** Теория пирометаллургического рафинирования. Ликвация, дистилляция (возгонка), окислительное рафинирование. Термодинамические условия удаления примесей (Fe, As, Sb, Zn) из черновых металлов.
- **Тема 4.3.** Материальные и тепловые балансы пирометаллургических агрегатов. Методика составления балансов, статьи прихода и расхода, оценка тепловой эффективности печи.

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ (ФОС)

(Изменение: ФОС полностью переработан, убраны таблицы, добавлены современные форматы контроля: тесты, соответствие, открытые вопросы и производственные кейсы)

5.1. Тестовые задания для текущего контроля (примеры)

- **Вопрос 1:** Какая термодинамическая функция определяет направление самопроизвольного протекания химической реакции при постоянных температуре и давлении? а) Энтальпия (H); б) Энтропия (S); в) Энергия Гиббса (G); г) Внутренняя энергия (U). (Правильный ответ: в)
- **Вопрос 2:** Что характеризует «активность» компонента в шлаковом расплаве? а) Его массовую долю в шлаке; б) Его эффективную концентрацию, определяющую химический потенциал; в) Температуру ликвидуса шлака; г) Вязкость расплава. (Правильный ответ: б)

5.2. Задания на установление соответствия

- **Задание:** Установите соответствие между типом потерь цветного металла со шлаком и методом его устранения:
 1. Механические потери -> А) Повышение температуры плавки и выдержка шлака для коагуляции капель.
 2. Химические потери -> Б) Флюсование для снижения вязкости и плотности шлака.
 3. Физико-химические потери -> В) Изменение основности шлака или парциального давления кислорода для восстановления оксида металла.

5.3. Открытые вопросы для устного опроса и рубежного контроля

- Вопрос 1. Постройте и проанализируйте изотермическое сечение тройной системы Cu-Fe-S при температуре 1200°C. Объясните, почему при плавке медного концентрата образуется именно штейн, а не сплав меди с железом.
- Вопрос 2. В чем заключается сущность модели ионных расплавов Темкина-Шварцмана? Как с ее помощью рассчитывается активность оксида в сложном шлаке?
- Вопрос 3. Опишите кинетические стадии процесса окисления сульфидной частицы во взвешенном состоянии. Какая стадия является лимитирующей при флэш-плавке и почему?
- Вопрос 4. Как влияет увеличение основности шлака на активность оксида цветного металла (например, NiO или Cu₂O) и, следовательно, на степень его извлечения в металлическую или штейновую фазу?

5.4. Ситуационные задачи (кейсы) для промежуточной аттестации

- **Кейс 1 (Термодинамический анализ).** При плавке никелевого концентрата с высоким содержанием магнезия (серпентин) наблюдается резкий рост вязкости шлака и увеличение потерь никеля с ним до 1.5%. Используя принципы термодинамики шлаковых расплавов, предложите три конкретных технологических мероприятия по изменению состава шлака (введение флюсов, изменение соотношения CaO/SiO₂ или температуры), обосновав их влияние на активность NiO и физико-химические свойства шлака.
- **Кейс 2 (Расчетно-аналитический).** Составьте укрупненный материальный баланс процесса конвертирования медного штейна (25% Cu, 40% Fe, 30% S) в черновую медь. Исходные данные: масса штейна 1000 кг, расход воздуха с 21% O₂, флюс (кварц) подается для связывания железа в силикатный шлак (2FeO·SiO₂). Рассчитайте теоретический расход кислорода, массу полученного конверторного шлака и объем выделившегося SO₂.

5.5. Критерии оценивания

- **«Отлично»:** Глубокое понимание термодинамических и кинетических основ, свободное чтение фазовых диаграмм, умение выполнять сложные расчеты материальных балансов и аргументированно решать производственные кейсы.
 - **«Хорошо»:** Хорошее знание основных закономерностей, умение решать типовые расчетные задачи, незначительные неточности в анализе многокомпонентных фазовых равновесий.
 - **«Удовлетворительно»:** Знание базовых определений и законов, умение решать простейшие задачи с использованием подсказок, поверхностное понимание влияния параметров на равновесие.
 - **«Неудовлетворительно»:** Незнание основ химической термодинамики, неумение рассчитать простейший материальный баланс или объяснить принцип протекания пирометаллургической реакции.
-

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

(Изменение: литература актуализирована, добавлены современные издания и электронные ресурсы по термодинамическому моделированию)

6.1. Рекомендуемая литература 6.1.1. Основная литература:

1. Кулаков В.И., Газдык В.Г. Теория металлургических процессов: учебник для вузов. – М.: МИСиС, 2021. – 480 с.
2. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов: учебное пособие. – М.: Академкнига, 2020. – 416 с.
3. Быстров В.В. Термодинамика металлургических процессов и систем: практикум. – Екатеринбург: УрФУ, 2022. – 250 с.

6.1.2. Дополнительная литература:

1. Рейхель Я. Физико-химия металлургических расплавов: монография. – М.: Металлургия, 2019. – 320 с.
2. Справочник металлурга. Т. 2: Физико-химические свойства металлургических систем / Под ред. А.М. Большакова. – М.: Металлургия, 2018. – 512 с.

6.2. Перечень ресурсов сети «Интернет»

- Э1. Электронно-библиотечная система «Юрайт» – <https://www.biblio-online.ru>
- Э2. Электронно-библиотечная система «Лань» – <https://e.lanbook.com>
- Э3. База данных термодинамических свойств FactSage (демо-версия или учебный доступ через кафедру).
- Э4. Научная электронная библиотека eLibrary.ru – <https://www.elibrary.ru>

6.3. Программное обеспечение

- ПО1. Операционная система MS Windows 10/11 Professional или Astra Linux.

- ПО2. MS Office Professional Plus 2021 (Excel для выполнения расчетов материальных балансов).
 - ПО3. Специализированное ПО для термодинамического моделирования (FactSage, HSC Chemistry или аналоги, доступные в компьютерном классе).
-

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

- **Ауд. 108:** Учебная аудитория для лекций и семинаров, оснащенная мультимедийным проектором для демонстрации фазовых диаграмм и схем агрегатов.
 - **Ауд. 116:** Компьютерный класс для выполнения расчетных работ и термодинамического моделирования (15 ПК, доступ к специализированному ПО).
 - **Лаборатория пирометаллургии:** Муфельные печи сопротивления (до 1200°C), набор тиглей из разных огнеупоров, образцы промышленных шлаков, штейнов и концентратов для микроструктурного анализа, аналитические весы, пирометры.
-

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ (МУ)

(Изменение: вместо шаблонного текста даны конкретные, профессиональные рекомендации по изучению термодинамики и выполнению расчетов)

Общие рекомендации: «Теория пирометаллургических процессов» — это дисциплина, требующая не заучивания формул, а понимания физического смысла термодинамических и кинетических закономерностей. Ваша главная задача — научиться «видеть» процесс через призму фазовых диаграмм и уравнений химического равновесия.

Рекомендации по работе с фазовыми диаграммами и термодинамикой:

- При изучении каждой темы начинайте с анализа соответствующей фазовой диаграммы (например, Fe-S-O или Cu-Fe-S). Определите устойчивые фазы при заданных температуре и парциальном давлении кислорода.
- При выполнении расчетных задач всегда начинайте с записи уравнения химической реакции и формулы для расчета изменения энергии Гиббса ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ или через константу равновесия).
- Активно используйте правило рычага для определения количественного соотношения фаз в двухфазной области диаграммы состояния.

Рекомендации по выполнению расчетных заданий (материальные балансы):

1. Четко определите базу расчета (например, 1000 кг шихты или 1 тонна товарного металла).
2. Составьте таблицу химического состава всех исходных материалов (концентрат, флюс, топливо) и ожидаемых продуктов (штейн, шлак, газы).
3. Запишите уравнения реакций, протекающих в агрегате, и стехиометрические соотношения.
4. Выполняйте расчеты последовательно: сначала элементы, переходящие в газовую фазу (S, C), затем в шлак (Fe, Si, Ca), и в конце — в целевой продукт (Cu, Ni).

5. Обязательно проверьте сходимость баланса: сумма прихода должна равняться сумме расхода (допустимая погрешность не более 1-2%). Все расчеты оформляйте в MS Excel.

Подготовка к промежуточной аттестации:

- За 4 недели: повторите законы химической термодинамики и методы расчета энергии Гиббса.
- За 3 недели: прорешайте все задачи по построению и анализу фазовых диаграмм, а также по расчету активностей.
- За 2 недели: разберите ситуационные кейсы из ФОС, научитесь аргументированно предлагать изменения технологического режима на основе физико-химических данных.
- За 1 неделю: повторите методику составления материального и теплового балансов плавильного агрегата.

ПРИЛОЖЕНИЯ

(Изменение: добавлен полноценный раздел приложений, делающий программу методически завершенной)

Приложение А. Полный комплект Фонда оценочных средств (детализированные тестовые базы, карты оценивания ситуационных кейсов, критерии защиты расчетных заданий) – размещен в ЭИОС ЗГУ.

Приложение Б. Методические указания по выполнению расчетно-графической работы (РГР) «Термодинамический анализ и расчет материального баланса процесса плавки сульфидного концентрата» с пошаговым алгоритмом и примером оформления в Excel.

Приложение В. Атлас основных фазовых диаграмм металлургических систем (Me-S, Me-O, Me-S-O) с комментариями по их применению в технологии меди и никеля.

Приложение Г. Глоссарий основных терминов дисциплины (активность, энергия Гиббса, флэш-плавка, штейн, основность шлака, лимитирующая стадия и др.).