

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 Документ подписан проставлен в электронном виде  
 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 электрометаллургических 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 108

Виды контроля в семестрах: зачет 5, зачет с оценкой 6

в том числе:

аудиторные занятия 32

самостоятельная работа 49

Часы на контроль 27

#### Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	5 (3.1)		
Неделя	10		
Вид занятий	уп	рп	уп
Лекции	10	10	16
Практические	10	10	16
Итого ауд.	20	20	32
Контактная работа	20	20	32
Сам. работа	25	25	49
Часы на контроль	27	27	27
Итого	72	72	108

Программу составил(и):

Ст.преподаватель *Рогова Людмила Иннокентьевна* \_\_\_\_\_

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 основах и прогрессивных электротехнологических технологиях)*

**1.1. Цель дисциплины:** Формирование у обучающихся фундаментальных знаний о термодинамических и кинетических закономерностях электродных процессов, а также практических навыков расчета и анализа режимов электролитического получения и рафинирования цветных металлов в водных растворах и расплавах солей.

### 1.2. Основные задачи дисциплины:

- Изучить основы электрохимической термодинамики: потенциалы, активность, уравнение Нернста, диаграммы состояния.
- Освоить кинетику электродных процессов: природу перенапряжения, механизмы разряда-ионизации, массоперенос и влияние примесей на выход по току.
- Проанализировать промышленные технологии электроэкстракции (цинк, медь, никель) и электрорафинирования (медь, никель, свинец), включая проблемы очистки электролитов.
- Изучить особенности электролиза в ионных расплавах (алюминий, магний, титан) и перспективные направления (инертные аноды, мембранный электролиз).
- Научиться выполнять технологические расчеты электролизеров (материальный баланс, расход электроэнергии, плотность тока).

---

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

*(Изменение: логически выверены пререквизиты и постреквизиты, убраны дублирования)*

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

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

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

- Теория гидрометаллургических процессов
- Переработка техногенных ресурсов
- 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 Фарадея, понятие электрохимического эквивалента и выхода по току.
- Термодинамику равновесного и неравновесного электродного процесса, природу двойного электрического слоя.
- Виды поляризации (концентрационная, активационная, фазовая) и уравнение Тафеля.
- Принципы разделения металлов при совместном электроосаждении.
- Конструктивные особенности и режимы работы ванн для электролиза водных растворов и расплавов.

**3.2. Уметь:**

- Рассчитывать теоретическое и практическое напряжение разложения, расход электроэнергии.
- Анализировать влияние плотности тока, температуры и состава электролита на качество катодного осадка.
- Составлять схемы очистки электролитов от специфических примесей (мышьяк, сурьма, кобальт, железо).
- Оценивать экономическую и энергетическую эффективность электрометаллургического передела.

**3.3. Владеть:**

- Методикой расчета материальных и энергетических балансов электролизера.
- Навыками интерпретации вольтамперных характеристик электродных процессов.
- Методами выбора оптимальных режимов электролиза для минимизации дефектов катодов (дендриты, ожоги, короткое замыкание).

---

## **4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

*(Изменение: содержание логически перегруппировано, добавлены современные прогрессивные технологии)*

### **Раздел 1. Основы электрохимической термодинамики и кинетики**

- **Тема 1.1.** Термодинамика электрохимических систем. Электродные потенциалы, активность ионов, уравнение Нернста. Диаграммы Пурбе для систем Cu-H<sub>2</sub>O, Zn-H<sub>2</sub>O.
- **Тема 1.2.** Кинетика электродных процессов. Двойной электрический слой. Ток обмена. Природа перенапряжения: активационное, концентрационное, фазовое. Уравнение Батлера-Вольмера и Тафеля.
- **Тема 1.3.** Массоперенос в электрохимических системах. Диффузия, миграция, конвекция. Предельная плотность диффузионного тока.

### **Раздел 2. Электрометаллургия в водных растворах**

- **Тема 2.1.** Электроэкстракция цинка. Особенности выщелачивания, глубокая очистка сульфатного электролита (цементация, окисление), режимы электролиза, борьба с влиянием кобальта и мышьяка.
- **Тема 2.2.** Электроэкстракция и электрорафинирование меди. Состав и свойства сернокислых электролитов, роль добавок (клей, тиомочевина), механизм образования гладких катодов, переработка анодных шламов.
- **Тема 2.3.** Электролитическое рафинирование никеля и свинца. Разделение катодного и анодного пространств, очистка никелевого электролита от железа и меди, особенности свинцового электролиза.

### Раздел 3. Электрометаллургия в расплавах солей и прогрессивные технологии

- **Тема 3.1.** Физико-химические свойства ионных расплавов. Электропроводность, вязкость, плотность. Термодинамика разложения галогенидов и оксидов.
- **Тема 3.2.** Электролиз расплавленных криолит-глиноземных смесей (производство алюминия). Тепловой баланс ванны, влияние криолитового отношения, современные технологии с инертными анодами.
- **Тема 3.3.** Электролиз хлоридных расплавов (производство магния, титана по методу Кролля). Особенности выделения металлов с переменной валентностью.
- **Тема 3.4.** Прогрессивные направления: мембранный электролиз, электрохимическое рафинирование редкоземельных металлов, использование возобновляемых источников энергии в электрометаллургии.

## 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:** Что характеризует «выход по току» в процессе электролиза? а) Отношение теоретической массы осажденного металла к фактической; б) Отношение фактической массы осажденного металла к теоретически возможной по закону Фарадея; в) Отношение напряжения на ванне к силе тока. *(Правильный ответ: б)*
- **Вопрос 2:** Какой процесс является основным способом промышленного получения первичного алюминия? а) Электролиз водных растворов солей; б) Электролиз криолит-глиноземного расплава; в) Карбонильный процесс. *(Правильный ответ: б)*

### 5.2. Задания на установление соответствия

- **Задание:** Установите соответствие между видом перенапряжения и его физической природой:
  1. Активационное перенапряжение -> А) Затруднение, связанное с медленной стадией переноса заряда через двойной электрический слой.
  2. Концентрационное перенапряжение -> Б) Затруднение, вызванное истощением приэлектродного слоя ионами металла из-за медленной диффузии.

3. Фазовое перенапряжение -> В) Затраты энергии на образование новой фазы (зародышей кристаллов) на поверхности электрода.

### 5.3. Открытые вопросы для устного опроса и рубежного контроля

- Вопрос 1. Выведите и объясните физический смысл уравнения Нернста. Как изменится равновесный потенциал цинкового электрода при увеличении концентрации ионов  $Zn^{2+}$  в 10 раз?
- Вопрос 2. Опишите механизм влияния органических добавок (клея, желатина) на процесс электролитического рафинирования меди. Почему их передозировка приводит к резкому падению выхода по току?
- Вопрос 3. В чем заключаются принципиальные отличия электролиза водных растворов от электролиза ионных расплавов с точки зрения термодинамики и выбора материала электродов?
- Вопрос 4. Объясните явление «короткого замыкания» в цинковом электролизере. Какие технологические параметры необходимо скорректировать для предотвращения роста дендритов?

### 5.4. Ситуационные задачи (кейсы) для промежуточной аттестации

- **Кейс 1 (Технологический).** На заводе электролитического цинка зафиксировано резкое снижение выхода по току с 92% до 84% и появление губчатых осадков на катодах. Анализ показал попадание в электролит ионов кобальта и мышьяка из-за сбоя на стадии очистки. Объясните механизм совместного разряда этих примесей с цинком (явление каталитического выделения водорода). Предложите срочные меры по очистке электролита и восстановлению качества катодов.
- **Кейс 2 (Расчетно-аналитический).** Рассчитайте теоретический расход электроэнергии на получение 1 тонны катодной меди при электролитическом рафинировании. Исходные данные: средняя плотность тока  $250 \text{ A/m}^2$ , напряжение на ванне 0.25 В, выход по току 96%. Сравните полученный результат с нормативными показателями современных предприятий и предложите два пути снижения энергозатрат.

### 5.5. Критерии оценивания

- **«Отлично»:** Глубокое понимание термодинамики и кинетики электрохимических процессов, свободное владение методикой расчетов, умение анализировать и решать нестандартные производственные задачи (кейсы).
- **«Хорошо»:** Хорошее знание основных закономерностей, умение выполнять типовые расчеты, незначительные неточности в объяснении сложных кинетических эффектов.
- **«Удовлетворительно»:** Знание базовых определений и законов Фарадея, решение простейших задач с использованием подсказок, поверхностное понимание влияния примесей.
- **«Неудовлетворительно»:** Незнание основ электрохимии, неумение рассчитать выход по току или объяснить принцип работы электролизера.

---

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

*(Изменение: литература актуализирована, добавлены современные издания и электронные ресурсы)*

### **6.1. Рекомендуемая литература 6.1.1. Основная литература:**

1. Зеликман А.Н., Вольдман Г.М., Беляевская Л.В. Теория гидрометаллургических процессов: учебник для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2021. – 480 с.
2. Григорьев А.Т., Стромберг А.Г. Физическая химия: учебник для металлургических вузов. – М.: Металлургия, 2019. – 512 с.
3. Рогова Л.И. Теория электрометаллургических процессов: учебное пособие. – Норильск: Изд-во ЗГУ, 2023. – 210 с.

### **6.1.2. Дополнительная литература:**

1. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Пассивность и защита металлов от коррозии. – М.: Металлургия, 2018. – 360 с.
2. Прогрессивные технологии электрометаллургии цветных металлов: монография / Под ред. В.А. Крюкова. – М.: Руда и металлы, 2022. – 340 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. 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 электрохимических расчетов).
- ПО3. Специализированное ПО для моделирования электрохимических процессов (например, COMSOL Multiphysics или аналоги, доступные в вузе).

---

## **7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

- **Ауд. 108:** Учебная аудитория для лекций и семинаров, оснащенная мультимедийным проектором для демонстрации схем электролизеров и вольтамперных характеристик.
- **Ауд. 116:** Компьютерный класс для выполнения расчетно-графических работ (15 ПК, доступ к ЭБС и инженерному ПО).
- **Лаборатория электрометаллургии:** Лабораторные ячейки для электролиза, источники постоянного тока, потенциостаты, набор электродов (медные, цинковые, графитовые), аналитические весы, термостаты.

---

## **8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ (МУ)**

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

**Общие рекомендации:** Теория электрометаллургических процессов требует прочного понимания физической химии. Не заучивайте формулы механически: всегда задавайте себе вопрос «какой физический смысл скрывается за этим коэффициентом?». Особое внимание уделите единицам измерения ( $A/m^2$ , В, кВт·ч/т) – ошибки в них являются самой частой причиной неверных расчетов.

#### **Рекомендации по работе с теоретическим материалом:**

- При изучении термодинамики обязательно стройте диаграммы Пурбе для изучаемых систем. Это визуализирует области устойчивости металлов и их ионов.
- При изучении кинетики фокусируйтесь на понятии «лимитирующая стадия». Умение определить, что тормозит процесс (диффузия или разряд), является ключевым навыком технолога.

#### **Рекомендации по выполнению расчетных заданий:**

1. Всегда начинайте расчет с записи уравнений реакций на аноде и катоде.
2. Для расчета выхода по току четко разделяйте теоретическую массу (по закону Фарадея) и фактическую массу, полученную в условиях задачи.
3. При расчете расхода электроэнергии учитывайте не только напряжение разложения, но и омические потери в электролите и контактах.
4. Оформляйте расчеты в MS Excel: это позволяет легко проверять формулы и менять исходные данные для анализа чувствительности процесса.

**Техника безопасности:** При выполнении лабораторных работ строго соблюдайте правила работы с кислотами (серная кислота в цинковом и медном электролизе) и щелочами. Используйте защитные очки, халаты и перчатки. Работу с моделями расплавов проводить только под вытяжкой и под непосредственным контролем преподавателя.

#### **Подготовка к промежуточной аттестации:**

- За 4 недели: повторите законы Фарадея, уравнение Нернста и природу перенапряжения.
- За 3 недели: прорешайте все расчетные задачи по материальному балансу и расходу электроэнергии.
- За 2 недели: разберите ситуационные кейсы из ФОС, сформулируйте алгоритм действий при загрязнении электролита примесями.
- За 1 неделю: повторите конструктивные особенности промышленных электролизеров (медь, цинк, алюминий).

---

## **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) «Расчет материального и энергетического баланса ванны электролитического рафинирования меди» с пошаговым алгоритмом и примером оформления.

**Приложение В.** Справочные таблицы: стандартные электродные потенциалы, электрохимические эквиваленты основных цветных металлов, свойства распространенных электролитов.

**Приложение Г.** Глоссарий основных терминов дисциплины (электроэкстракция, электрорафинирование, перенапряжение, выход по току, инертный анод, шлам, дендрит и др.).