

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Крюков Вадим Николаевич
Должность: Проректор по образовательной деятельности и молодежной политике
Дата подписания: 15.06.2026 10:51:25
Уникальный программный ключ:
1b0adb7fd710f6a0705d90c58682bd0c5f2f25b2

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Заполярье государственный университет им. Н. М. Федоровского»
ЗГУ

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
по дисциплине

«Теория электрометаллургических процессов»

Факультет: ГТФ

Направление подготовки: 22.03.02 «Металлургия»

Направленность (профиль): «Прогрессивные методы получения цветных металлов»

Уровень образования: бакалавриат

Кафедра «Металлургии, машин и оборудования»
наименование кафедры

Разработчик ФОС:

Старший преподаватель
(должность, степень, ученое звание)

(подпись)

Рогова Л.И.
(ФИО)

Оценочные материалы по дисциплине рассмотрены и одобрены на заседании кафедры ММиО, протокол № 11 от 10.06.2026
И.о. заведующего кафедрой к.т.н., доцент Е.В. Лаговская

Фонд оценочных средств по дисциплине *Теория электрометаллургических процессов* разработан для текущей/ промежуточной аттестации разработан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 22.03.02 *Металлургия на основе Рабочей программы дисциплины Теория электрометаллургических процессов*, Положения о формировании Фонда оценочных средств по дисциплине (ФОС), Положения о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся ЗГУ, Положения о государственной итоговой аттестации (ГИА) выпускников по образовательным программам высшего образования в ЗГУ им. Н.М. Федоровского.

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

Код компетенции: ПК-2 **Содержание:** Выявляет объекты для улучшения в технике и технологии.

Индикаторы достижения:

1. ПК-2.1. Анализирует качество технологического процесса, качества продукции по результатам аналитического контроля.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

Знать: основные понятия электрометаллургии; термодинамику и кинетику равновесных и неравновесных электрохимических систем; природу электродных потенциалов, поляризации и перенапряжения; механизмы стадий разряда-ионизации и электрокристаллизации; теорию электролитического рафинирования и электроэкстракции цветных металлов.

Уметь: рассчитывать равновесные и неравновесные потенциалы электродов по уравнению Нернста; определять выход по току и расход электроэнергии; анализировать причины поляризации и способы её снижения; оценивать влияние примесей на качество катодных металлов.

Владеть: методами электрохимических измерений; навыками расчёта материальных и электрических балансов электролитных процессов; способами контроля качества электролитов и катодных осадков.

2. ПАСПОРТ ФОНДА ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

2. Паспорт фонда оценочных средств

Раздел 1. Основные понятия электрометаллургии. Равновесный электродный процесс.

1. Формируемая компетенция: ПК-2
2. Оценочные средства: Тестовые задания.

Раздел 2. Неравновесная электрохимическая система. Кинетика электродных процессов.

1. Формируемая компетенция: ПК-2
2. Оценочные средства: Тестовые задания, расчетные задачи.

Раздел 3. Концентрационная поляризация. Кинетика стадии разряда-ионизации. Фазовое перенапряжение.

1. Формируемая компетенция: ПК-2
2. Оценочные средства: Тестовые задания, ситуационные кейсы.

Раздел 4. Особенности электролитического рафинирования цветных металлов.

1. Формируемая компетенция: ПК-2
2. Оценочные средства: Тестовые задания, ситуационные кейсы.

Промежуточная аттестация (Зачет).

1. Оценочные средства: Комплексное тестирование по всем разделам.

3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания (Технологическая карта)

Форма промежуточной аттестации: Зачет. **Пороговый (минимальный) уровень:** 75 % от максимально возможной суммы баллов.

Шкала оценивания (процент от максимальной суммы баллов):

1. 0 – 74 % – «Незачет».
2. 75 – 100 % – «Зачет».

4. ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ (ВАРИАНТ 1)

Блок 1. Основы электрохимии и термодинамика

Задание 1.1 (Выбор одного правильного ответа) Чему равняется обратимый потенциал медного электрода при $T = 298 \text{ K}$, опущенного в раствор сульфата меди с активностью ионов $\text{Cu}^{2+} = 0,001$, если стандартный потенциал медного электрода составляет $+0,34 \text{ В}$? А) $-0,252 \text{ В}$ Б) $+0,250 \text{ В}$ В) $-0,415 \text{ В}$ Г) $+0,179 \text{ В}$

Задание 1.2 (На установление соответствия) Установите соответствие между типом электрода и его классическим примером. Типы электродов:

1. Электрод первого рода.
2. Электрод второго рода.
3. Окислительно-восстановительный (редокс) электрод.
4. Ионообменный электрод. Примеры: А) Платиновая проволока в растворе, содержащем ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} . Б) Медная пластинка, опущенная в раствор сульфата меди ($\text{Cu} | \text{CuSO}_4$). В) Стекланный электрод. Г) Серебряная проволока, покрытая хлоридом серебра, опущенная в раствор KCl ($\text{Ag} | \text{AgCl}, \text{KCl}$).

Блок 2. Кинетика электродных процессов и массоперенос

Задание 2.1 (На установление правильной последовательности) Установите правильную хронологическую последовательность элементарных стадий процесса катодной электрокристаллизации металла. Запишите ответ в виде последовательности букв (например, Б-В-А-Г). А) Поверхностная диффузия адатомов (адсорбированных атомов) к активным центрам роста на поверхности. Б) Массоперенос ионов металла из объема раствора к поверхности электрода (диффузия, миграция, конвекция). В) Встраивание атома в кристаллическую решетку металла (собственно кристаллизация). Г) Акт переноса электрона (разряд иона) с образованием нейтрального атома на поверхности.

Задание 2.2 (Открытый вопрос с кратким ответом) Назовите три основных вида перенапряжения, которые в сумме составляют общее перенапряжение на электроде.

Блок 3. Электролиз и электролитическое рафинирование цветных металлов

Задание 3.1 (Открытый вопрос с развернутым ответом) Объясните механизм образования «плавучего шлама» при электролитическом рафинировании меди. Назовите не менее трех химических элементов-примесей, которые наиболее активно способствуют его образованию, и укажите ключевую химическую реакцию, лежащую в основе этого процесса.

Блок 4. Ситуационный кейс (Расчетно-аналитическое задание)

Задание 4.1 Электролизерная ванна медного рафинирования работает при следующих параметрах:

- Плотность тока на катоде: 250 А/м^2 .
- Площадь одного катода: $1,2 \text{ м}^2$.
- Количество катодов в ванне: 30 шт.
- Выход по току: 94 %.
- Продолжительность электролиза: 12 суток (непрерывно).
- Электрохимический эквивалент меди (Cu^{2+}): $1,185 \text{ г/(А}\cdot\text{ч)}$.

Требуется:

1. Рассчитать общую силу тока на ванне (в кА).
2. Рассчитать фактическую массу осажденной меди за 12 суток (в кг).
3. Определить теоретический расход электроэнергии на 1 тонну катодной меди (в кВт·ч/т), если среднее напряжение на ванне составляет $0,32 \text{ В}$.

ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ (ВАРИАНТ 2)

Блок 1. Основы электрохимии и термодинамика

Задание 1.1 (Выбор одного правильного ответа) Какой из перечисленных металлов будет выделяться на катоде в первую очередь при электролизе раствора, содержащего ионы Ni^{2+} , Co^{2+} и Cu^{2+} , при стандартных условиях? А) Ni Б) Co В) Cu Г) Выделятся одновременно в виде сплава

Задание 1.2 (На установление соответствия) Установите соответствие между названием перенапряжения и причиной его возникновения. Виды перенапряжения:

1. Диффузионное перенапряжение.
2. Химическое (реакционное) перенапряжение.

3. Кристаллизационное перенапряжение. Причины: А) Замедленность стадии встраивания атомов в кристаллическую решетку. Б) Медленная скорость предшествующей или последующей гомогенной химической реакции. В) Замедленная скорость доставки разряжающихся ионов к поверхности электрода из-за истощения приэлектродного слоя.

Блок 2. Кинетика электродных процессов и массоперенос

Задание 2.1 (На установление правильной последовательности) Установите правильную последовательность операций при очистке сульфатного электролита цинка от примесей (медь, кадмий, кобальт) методом цементации. А) Фильтрация раствора для удаления кека (осадка). Б) Введение в раствор цинковой пыли. В) Нагрев раствора и интенсивное перемешивание. Г) Контроль окислительно-восстановительного потенциала (редокс-потенциала) раствора.

Задание 2.2 (Открытый вопрос с кратким ответом) Назовите два основных поверхностно-активных вещества (ПАВ), которые традиционно добавляют в электролит при рафинировании меди для получения плотного и гладкого осадка.

Блок 3. Электролиз и электролитическое рафинирование цветных металлов

Задание 3.1 (Открытый вопрос с развернутым ответом) Почему при электролитическом рафинировании меди отсечку (вывод на очистку) части оборотного электролита производят преимущественно по накоплению никеля и кобальта, а не по накоплению меди или благородных металлов? Дайте развернутое обоснование, опираясь на электрохимические свойства этих элементов.

Блок 4. Ситуационный кейс (Расчетно-аналитическое задание)

Задание 4.1 Необходимо провести электроэкстракцию цинка из очищенного сульфатного раствора. Параметры процесса:

- Сила тока на ванне: 15 кА.
- Продолжительность процесса: 24 часа.
- Выход по току по цинку: 88 %.
- Электрохимический эквивалент цинка (Zn^{2+}): 1,22 г/(А·ч).
- Среднее напряжение на ванне: 3,4 В.

Требуется:

1. Рассчитать фактическую массу полученного цинка (в кг).
2. Рассчитать удельный расход электроэнергии на 1 тонну цинка (в кВт·ч/т).
3. Объяснить, почему выход по току при электроэкстракции цинка всегда меньше 100 %, и назовите основной побочный процесс на катоде.

КЛЮЧИ (ОТВЕТЫ) И ДЕТАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ

Ключи к Варианту 1:

- Задание 1.1: Б (Расчет по Нернсту: $0,34 + (0,059/2) \cdot \lg(0,001) = 0,34 - 0,0885 \approx +0,25$ В).
- Задание 1.2: 1-Б, 2-Г, 3-А, 4-В.
- Задание 2.1: Б -> Г -> А -> В.
- Задание 2.2: Электрохимическое, диффузионное (концентрационное), фазовое (кристаллизационное).
- Задание 3.1: Механизм: реакция диспропорционирования ($2Cu^+ \rightarrow Cu^0 + Cu^{2+}$), катализируемая примесями. Примеси: Мышьяк (As), Сурьма (Sb), Висмут (Bi). Они образуют арсениды и стибиды меди (Cu_3As , Cu_3Sb), которые имеют малую плотность и всплывают, механически загрязняя катод.
- Задание 4.1:
 1. $I = 250 \cdot 1,2 \cdot 30 = 9000$ А = 9 кА.
 2. $m_{\text{факт}} = 1,185 \cdot 9000 \cdot (12 \cdot 24) \cdot 0,94 = 2\,882\,500$ г = 2882,5 кг.
 3. $W_{\text{уд}} = (U \cdot I \cdot t) / m_{\text{факт}} = (0,32 \cdot 9000 \cdot 288) / 2882,5 \approx 287,7$ кВт·ч/т.

Ключи к Варианту 2:

- Задание 1.1: В (У меди самый положительный стандартный потенциал +0,34 В).
- Задание 1.2: 1-В, 2-Б, 3-А.
- Задание 2.1: Б -> В -> Г -> А.

- **Задание 2.2:** Столярный (мездровый) клей и тиомочевина.
- **Задание 3.1:** Ni и Co имеют потенциалы, близкие к меди, поэтому они анодно растворяются и накапливаются в электролите, не выделяясь на катоде (из-за высокой перенапряжения водорода и концентрации). Благородные металлы не растворяются, а падают в шлам. Медь не накапливается, так как ее концентрация поддерживается балансом растворения анода и осаждения на катоде. Накопление Ni/Co повышает вязкость и удельное сопротивление электролита.
- **Задание 4.1:**
 1. $m_{\text{факт}} = 1,22 * 15000 * 24 * 0,88 = 386\ 496 \text{ г} = 386,5 \text{ кг}$.
 2. $W_{\text{уд}} = (3,4 * 15000 * 24) / 386,5 \approx 3167 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$.
 3. **Основной побочный процесс:** выделение водорода на катоде ($2\text{H}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{H}_2$), так как потенциал выделения водорода на цинке имеет высокое перенапряжение, но часть тока все равно тратится на этот процесс.

Детальные критерии оценивания (для преподавателя):

1. Задания с выбором ответа (1.1): 1 балл за каждый верный ответ.
2. Задания на соответствие (1.2): 1 балл за полностью верное соответствие. 0,5 балла, если допущена одна ошибка в паре. 0 баллов при двух и более ошибках.
3. Задания на последовательность (2.1): 1 балл за абсолютно правильную последовательность. 0,5 балла, если перепутаны местами только два соседних элемента. 0 баллов при грубом нарушении логики процесса.
4. Открытые вопросы с кратким ответом (2.2): 1 балл за полный и точный ответ. 0,5 балла, если назван только один верный элемент из двух требуемых.
5. Открытые вопросы с развернутым ответом (3.1): Максимум 3 балла.
 - 3 балла: Полное объяснение механизма, верно названы все 3 примеси, указана реакция диспропорционирования.
 - 2 балла: Объяснение механизма верное, названы 2 примеси, реакция не указана или указана с ошибкой.
 - 1 балл: Общее, поверхностное описание без указания конкретных химических механизмов или примесей.
6. Ситуационный кейс (4.1): Максимум 5 баллов.
 - 5 баллов: Верно решены все 3 подпункта, указаны единицы измерения, во 2-м варианте дано верное теоретическое обоснование побочного процесса.
 - 4 балла: Верно решены 2 подпункта, в третьем допущена незначительная арифметическая или теоретическая неточность.
 - 3 балла: Верно начаты все расчеты (правильные формулы), но есть ошибки в вычислениях; теоретическая часть раскрыта частично.
 - 1-2 балла: Применены неверные формулы, но ход мыслей в теоретической части частично верен.

5. ЗАДАНИЯ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ (СИТУАЦИОННЫЕ КЕЙСЫ)

Кейс 1. Расчет режима электролитического рафинирования меди

Условие: Электролизерная ванна медного рафинирования работает при следующих параметрах:

1. Плотность тока на катоде: 250 А/м².
2. Площадь катода: 1,2 м².
3. Количество катодов в ванне: 30 шт.
4. Выход по току: 94 %.
5. Продолжительность электролиза: 12 суток (непрерывно).
6. Содержание меди в аноде: 98,5 %.
7. Содержание меди в катоде: 99,95 %.

Задание:

1. Рассчитать общую силу тока на ванне (в кА).
2. Рассчитать теоретическую и фактическую массу осажденной меди за 12 суток (в кг).
3. Определить расход электроэнергии на 1 тонну катодной меди (в кВт·ч/т), если среднее напряжение на ванне составляет 0,32 В.

4. Рассчитать массу анодов, необходимую для загрузки в ванну на весь цикл (в кг).
(Атомная масса $Cu = 63,5$ г/моль, валентность $z = 2$, электрохимический эквивалент $Cu^{2+} = 1,185$ г/(А·ч))

Алгоритм решения (для преподавателя/самопроверки):

1. **Сила тока на ванне:** $I = i \cdot S \cdot n = 250 \cdot 1,2 \cdot 30 = 9000$ А = **9 кА**.
2. **Теоретическая масса меди:** $m_{\text{теор}} = k \cdot I \cdot t = 1,185 \cdot 9000 \cdot (12 \cdot 24) = 1,185 \cdot 9000 \cdot 288 = 3066480$ г \approx **3066,5 кг**. **Фактическая масса:** $m_{\text{факт}} = m_{\text{теор}} \cdot \eta = 3066,5 \cdot 0,94 = 2882,5$ кг.
3. **Расход электроэнергии:** $W = (U \cdot I \cdot t) / m_{\text{факт}} = (0,32 \cdot 9000 \cdot 288) / 2882,5 = 829440 / 2882,5 \approx 287,7$ кВт·ч/т. (Альтернативно через удельный расход: $W_{\text{уд}} = U / (k \cdot \eta) = 0,32 / (1,185 \cdot 10^{-3} \cdot 0,94) \approx 287,8$ кВт·ч/т).
4. **Масса анодов:** $m_{\text{анодов}} = m_{\text{факт}} / 0,985 = 2882,5 / 0,985 = 2926,4$ кг.

Кейс 2. Анализ причин загрязнения катодной меди и выбор технологических приемов

Условие: На заводе электролитического рафинирования меди появилась проблема: в катодной меди повысилось содержание примесей мышьяка (As) и сурьмы (Sb), а также наблюдаются механические включения тёмного шлама на поверхности катодов. Анализ показал:

1. В анодной меди содержание As выросло до 0,4 %, Sb — до 0,15 %.
2. В электролите снижена концентрация серной кислоты и отсутствует добавка ПАВ.
3. Плотность тока колеблется в широких пределах.

Вопросы:

1. Объясните механизм загрязнения катодной меди мышьяком и сурьмой. Какую роль играет диспропорционирование этих примесей?
2. Почему при снижении плотности тока и отсутствии ПАВ увеличивается механическое загрязнение катода плавучим шламом?
3. Предложите комплекс технологических мероприятий для восстановления качества катодной меди.

Алгоритм решения (для преподавателя/самопроверки):

1. **Механизм загрязнения As и Sb:**
 - Мышьяк и сурьма имеют потенциалы, близкие к меди, поэтому частично соосаждаются на катоде.
 - Ключевую роль играет реакция диспропорционирования: $2Cu^+ \rightarrow Cu^0 + Cu^{2+}$. Примеси As и Sb катализируют образование плавучего шлама (Cu_3As , Cu_3Sb), который механически переносится на катод.
 - В кислом электролите As и Sb находятся в виде коллоидных частиц, которые адсорбируются на катоде.
2. **Роль плотности тока и ПАВ:**
 - При низкой плотности тока осадок получается крупнокристаллическим, пористым, что облегчает механическое захватывание шлама.
 - ПАВ (клей, тиомочевина) создают на поверхности катода адсорбционный слой, который препятствует прилипанию частиц шлама и измельчает структуру осадка.
 - Без ПАВ шлам не удерживается в анодных мешках и свободно циркулирует в электролите.
3. **Комплекс мероприятий:**
 - **Ввести добавки ПАВ:** столярный клей (0,5–1,0 кг/т меди) + тиомочевина (0,1–0,2 кг/т меди).
 - **Стабилизировать плотность тока** в оптимальном диапазоне (280–320 А/м²).
 - **Увеличить концентрацию H_2SO_4** до 160–180 г/л для подавления гидролиза и снижения вязкости электролита.
 - **Усилить циркуляцию и фильтрацию электролита** для удаления взвешенных частиц.
 - **Контролировать отсечку электролита** по накоплению As и Sb (предельная концентрация As — 0,5 г/л).

6. КЛЮЧИ К ТЕСТОВЫМ ЗАДАНИЯМ (ВАРИАНТ 1) И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ

Ответы к тестовым заданиям (Вариант 1): 1-Б; 2-В; 3-А; 4-Г; 5-А; 6-Г; 7-Б; 8-Г; 9-Б; 10-Б; 11-Б; 12-В; 13-В; 14-Б; 15-А; 16-В; 17-А; 18-Г; 19-Г; 20-В; 21-Г; 22-В; 23-В; 24-В; 25-Б.

(Оценивание: 1 балл за каждый верный ответ. Максимум 25 баллов за тестовую часть).

Критерии оценивания Кейсов:

Кейс 1 (Расчетный): Максимум 10 баллов.

- **Отлично (9–10 баллов):** Верно рассчитаны все 4 параметра (сила тока, масса теоретическая и фактическая, удельный расход электроэнергии, масса анодов). Показан ход решения с использованием законов Фарадея.
- **Хорошо (7–8 баллов):** Верно рассчитаны 3 параметра, допущена одна арифметическая ошибка или упущен один параметр.
- **Удовлетворительно (5–6 баллов):** Верно рассчитаны 2 параметра, есть понимание физического смысла, но ошибки в формулах.
- **Неудовлетворительно (менее 5 баллов):** Рассчитан только 1 параметр или допущены принципиальные ошибки в применении законов Фарадея.

Кейс 2 (Аналитический): Максимум 15 баллов.

- **Отлично (13–15 баллов):** Студент подробно объясняет механизм диспропорционирования и роль коллоидных частиц. Верно указывает на синергетический эффект от совместного действия ПАВ (клей + тиомочевина). Предложен полный комплекс из 4–5 мероприятий с указанием конкретных параметров (концентрации, плотности тока).
- **Хорошо (10–12 баллов):** Верно описана роль диспропорционирования и ПАВ. Предложено 3 мероприятия, но без конкретных числовых параметров.
- **Удовлетворительно (7–9 баллов):** Общее описание проблемы без глубокого объяснения механизма. Предложены только общие меры («улучшить электролит», «добавить клей»).
- **Неудовлетворительно (менее 7 баллов):** Не выявлена связь между составом анода, диспропорционированием и качеством катода.