

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

Уникальный программный ключ:

1b0adb7fd710f6a0705d90c58682bd0c5f2f25b2

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования

«Заполярный государственный университет им. Н. М. Федоровского»
ЗГУ

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ¹
по дисциплине

«Расчеты металлургических процессов»

Факультет: Горно-технологический (ГТФ)

Направление подготовки: 22.04.02 «Металлургия»

Направленность (профиль): Металлургия цветных металлов

Уровень образования: магистратура

Кафедра «Металлургии, машин и оборудования»
наименование кафедры

Разработчик ФОС:

К.С-Х.Н., ДОЦЕНТ

(должность, степень, ученое звание)

(подпись)

О.В. Носова

(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

¹ В данном документе представлены типовые оценочные средства. Полный комплект оценочных средств, включающий все варианты заданий (тестов, контрольных работ и др.), предлагаемых обучающемуся, хранится на кафедре в бумажном и электронном виде.

Фонд оценочных средств по дисциплине **Расчеты металлургических процессов** для текущей/ промежуточной аттестации разработан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 22.04.02 Металлургия на основе Рабочей программы дисциплины **Расчеты металлургических 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, соотнесенных с планируемыми результатами образовательной программы

Профессиональные компетенции

ПК-1. Способен контролировать и корректировать заданные величины параметров и показателей процессов металлургического производства

- **ПК-1.3. (Знать)** методики стехиометрических, термодинамических расчетов, а также правила составления и расчета материальных, тепловых и электрических балансов пирометаллургических, гидрометаллургических и электрометаллургических переделов.
- **ПК-1.3. (Уметь)** осуществлять расчеты технологических схем и процессов на основании реальных технологических показателей, рассчитывать потребность в сырье, флюсах, топливе и электроэнергии, а также определять выходы продуктов плавки, выщелачивания или электролиза.
- **ПК-1.3. (Владеть)** навыками расчета необходимого технологического оборудования (объемов аппаратов, площадей зеркал, электрических нагрузок) для конкретной технологии и sizing (определения его габаритов) на основе уравнений материальных и тепловых балансов.

2. Паспорт фонда оценочных средств

Тема 1. Стехиометрические расчеты в металлургии

- Формируемая компетенция: ПК-1
- Наименование оценочного средства: Расчетные задачи, тестирование
- Форма оценивания: Письменно

Тема 2. Расчёт теплоемкости, энтальпий и тепловых эффектов реакций

- Формируемая компетенция: ПК-1

- Наименование оценочного средства: Практическая работа, тестирование
- Форма оценивания: Письменно

Тема 3. Расчёт материального и теплового баланса пирометаллургических процессов

- Формируемая компетенция: ПК-1
- Наименование оценочного средства: Курсовой проект (раздел), расчетные задачи
- Форма оценивания: Письменно (защита)

Тема 4. Расчёт материального и теплового баланса гидromеталлургических процессов

- Формируемая компетенция: ПК-1
- Наименование оценочного средства: Практическая работа
- Форма оценивания: Письменно

Тема 5. Расчёт электрического баланса процесса электролиза

- Формируемая компетенция: ПК-1
- Наименование оценочного средства: Практическая работа
- Форма оценивания: Письменно

Тема 6. Расчёт потребности оборудования и его размеров

- Формируемая компетенция: ПК-1
- Наименование оценочного средства: Курсовой проект (раздел), кейс-задача
- Форма оценивания: Письменно

Итоговая аттестация (Экзамен / Зачет с оценкой)

- Формируемая компетенция: ПК-1
- Наименование оценочного средства: Комплексный расчетный тест, защита курсового проекта
- Форма оценивания: Письменно / Устно

3. Перечень контрольно-оценочных средств (КОС)

Перечень и шкалы оценивания

1. Текущий контроль качества

- **Решение расчетных задач и практических работ:** Шкала оценивания — «Зачтено / не зачтено». Критерии: верность выбранных уравнений реакций, корректность стехиометрических коэффициентов, сходимость балансов (невязка не более 1-2%).

- **Курсовой проект:** Шкала оценивания — «Допущен / не допущен к защите». Критерии: соответствие ГОСТ, полнота разделов, наличие чертежей и схем, реалистичность технологических показателей.

2. Промежуточная аттестация (Экзамен)

- **Комплексный расчетный тест:** Шкала оценивания — 4-балльная (от 2 до 5).
- **Критерии выставления оценки:**
 - «Отлично» (5): 85–100% от максимально возможной суммы баллов. Безупречное выполнение теоретических заданий и расчетных кейсов, глубокое понимание физической сути металлургических процессов.
 - «Хорошо» (4): 75–84% баллов. Верные расчеты с незначительными арифметическими погрешностями, полное понимание методологии составления балансов.
 - «Удовлетворительно» (3): 65–74% баллов. Знание базовых формул, наличие ошибок в сложных комплексных расчетах, требующих помощи преподавателя.
 - «Неудовлетворительно» (2): 0–64% баллов. Незнание законов сохранения массы и энергии, принципиальные ошибки в стехиометрии и термодинамике.

4. Типовые контрольные задания и материалы для оценки знаний

4.1 Задания для текущего контроля успеваемости

Примеры расчетных задач для практических занятий:

Задача 1 (Пирометаллургия, материальный баланс). Рассчитать выход штейна при плавке 1000 кг медного концентрата. Состав концентрата: 25% Cu, 30% S, 28% Fe. Извлечение меди в штейн составляет 95%. Содержание меди в штейне по технологическим замерам равно 40%. Определить массу штейна и количество серы, перешедшей в газовую фазу (принять, что остальная сера находится в штейне в виде FeS и Cu₂S).

Задача 2 (Гидрометаллургия, материальный баланс). Рассчитать расход серной кислоты и объем воды, необходимый для приготовления пульпы с соотношением Т:Ж = 1:3 для выщелачивания 500 кг цинкового огарка. Огарок содержит 8% нерастворимого остатка. Определить массу и состав полученного раствора и кека, если извлечение цинка в раствор составляет 96%.

Задача 3 (Электрометаллургия, электрический баланс). Рассчитать теоретический и фактический расход электроэнергии на получение 1 тонны катодного цинка. Выход по току составляет 90%. Напряжение на ванне – 3,4 В. Электрохимический эквивалент цинка принять равным 1,22 г/(А·ч).

4.2 Задания для промежуточной аттестации (Экзамен)

Спецификация комплекта оценочных материалов

- Общее количество заданий: 15.
- Распределение по типам и уровням сложности:
 - Задания с выбором одного верного ответа (Базовый уровень): 3 шт.
 - Задания с выбором нескольких верных ответов (Продвинутый уровень): 3 шт.
 - Задания на установление соответствия (Продвинутый уровень): 2 шт.
 - Задания на установление последовательности (Экспертный уровень): 2 шт.
 - Задания открытого типа / Расчетные кейсы (Экспертный уровень): 5 шт.

Тестовые задания

Блок А. Задания с выбором одного верного ответа (Базовый уровень)

1. Какой фундаментальный закон лежит в основе составления материального баланса любого металлургического процесса? а) Закон сохранения энергии б) Закон постоянства состава соединений в) Закон сохранения массы вещества г) Закон Фарадея
2. Какая величина является определяющей при расчете электрического баланса процесса электролитического рафинирования или электроэкстракции? а) Теплота сгорания топлива б) Электрохимический эквивалент металла и выход по току в) Энтальпия образования шлака г) Коэффициент распределения компонента между фазами
3. Что такое «невязка» в материальном балансе, и каково ее допустимое значение в инженерных расчетах? а) Разница между приходом и расходом, допустимо до 1-2% б) Сумма всех примесей в концентрате, допустимо до 10% в) Погрешность весового оборудования, допустимо до 5% г) Потери металла с пылью, допустимо до 20%

Блок Б. Задания с выбором нескольких верных ответов (Продвинутый уровень)

4. Какие статьи прихода учитываются при составлении теплового баланса пирометаллургической печи (например, отражательной или шахтной)? (Выберите 3 верных варианта) а) Теплота экзотермических химических реакций б) Физическое тепло шихты и дутья в) Теплота сгорания топлива (если печь с внешним нагревом) г) Эндотермические эффекты диссоциации карбонатов
5. Какие факторы напрямую влияют на расчет необходимого объема флотационных машин при проектировании обогатительной фабрики? (Выберите 2 верных варианта) а) Плотность пульпы и время флотации б) Производительность фабрики по руде и содержание металла в концентрате в) Температура окружающей среды в цехе г) Химический состав флюсов
6. Какие параметры входят в уравнение теплового баланса гидromеталлургического процесса (автоклавного выщелачивания)? (Выберите 3 верных варианта) а)

Тепловые эффекты химических реакций растворения б) Затраты тепла на нагрев исходной шихты и раствора в) Потери тепла в окружающую среду через стенки аппарата г) Электрическое сопротивление электролита

Блок В. Задания на установление соответствия (Продвинутый уровень)

7. Установите соответствие между типом металлургического процесса и основным видом баланса, который является лимитирующим при расчете его энергоэффективности: А. Пирометаллургическая плавка (Кивцэт, Ванюков) Б. Электроэкстракция цветных металлов В. Автогенное выщелачивание
1. Электрический баланс и баланс по постоянному току
 2. Тепловой баланс (использование тепла экзотермических реакций)
 3. Материальный баланс по кислороду и кислотности среды
8. Установите соответствие между физической величиной и формулой/законом, используемым для ее расчета в металлургической термодинамике: А. Тепловой эффект сложной реакции (Q_{rxn}) Б. Теплоемкость сложной шихты (C_p) В. Теоретическая масса выделившегося металла (m)
1. Аддитивность (сумма теплоемкостей компонентов)
 2. Следствие из закона Гесса (сумма энтальпий продуктов минус энтальпии реагентов)
 3. Закон Фарадея ($M * I * t / (z * F)$)

Блок Г. Задания на установление последовательности (Экспертный уровень)

9. Установите правильную логическую последовательность этапов составления материального баланса плавильного процесса: А. Расчет массы и состава продуктов плавки (штейна, шлака, газов) Б. Выбор базы расчета (например, на 100 кг концентрата или на 1 тонну шихты) В. Проверка баланса (схождение прихода и расхода) Г. Составление уравнений протекающих химических реакций и расчет стехиометрии Д. Расчет массы и состава исходной шихты (концентрат, флюсы, топливо)
10. Установите последовательность этапов проектирования и расчета технологического оборудования: А. Определение единичной производительности аппарата Б. Расчет материального и теплового балансов процесса В. Выбор типа оборудования и определение его габаритных размеров Г. Определение необходимого количества единиц оборудования

Блок Д. Задания открытого типа / Расчетные кейсы (Экспертный уровень)

11. (Расчетный кейс). Рассчитать теоретический расход кокса (содержание углерода 85%) на восстановление 100 кг цинкового огарка, содержащего 60% Zn в виде ZnO. Принять, что восстановление идет по реакции $ZnO + C = Zn + CO$, а степень восстановления составляет 94%.

12. (Расчетный кейс). Определить выход конвертерного шлака при конвертировании медного штейна массой 50 тонн. Состав штейна: 40% Cu, 30% Fe, 25% S. В первом периоде конвертирования железо окисляется до Fe₃O₄ (магнетита) на 80% и до FeO на 20%. Для ошлакования магнетита в печь подают кварцевый флюс (90% SiO₂) по реакции $3\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{FeS} + 5\text{SiO}_2 = 5(2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2) + 2\text{SO}_2$. Рассчитать массу требуемого кварцевого флюса.
13. (Расчетный кейс). Рассчитать выход по току ($V_{\text{т}}$) и удельный расход электроэнергии (кВт·ч/кг) при электроэкстракции меди, если за 24 часа на ванне с токовой нагрузкой 30 кА (30000 А) и средним напряжением 0,35 В было получено 850 кг катодной меди. Электрохимический эквивалент меди принять равным 1,186 г/(А·ч).
14. (Инженерный кейс). Необходимо рассчитать требуемую площадь зеркала кессона для охлаждения технологических газов. Объем газов, поступающих на охлаждение, составляет 50 000 м³/ч. Температура газов на входе 1200 °С, на выходе 400 °С. Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке кессона составляет 40 Вт/(м²·К). Средняя температура стенки кессона 150 °С. Плотность газов принять равной 1,3 кг/м³, теплоемкость газов – 1,1 кДж/(кг·К).
15. (Комплексный кейс). Обоснуйте выбор базы расчета и составьте укрупненную схему материального баланса для процесса автоклавного окислительного выщелачивания тугоплавкого золотосодержащего концентрата. Укажите, какие компоненты обязательно должны быть учтены в статье «Расход» (выход), если процесс идет с использованием сжатого воздуха и известняка для нейтрализации образующейся серной кислоты.

5. Ключ верных вариантов ответов и критерии оценивания

Ключ к заданиям закрытого типа (Блоки А, Б, В, Г)

Блок А (по 1 баллу за правильный ответ)

1. в (Закон сохранения массы вещества)
2. б (Электрохимический эквивалент металла и выход по току)
3. а (Разница между приходом и расходом, допустимо до 1-2%)

Блок Б (по 1 баллу за полный правильный набор, 0 баллов при любой ошибке) 4. а, б, в (Теплота реакций, физическое тепло шихты, теплота сгорания топлива. Эндотермические эффекты — это статьи РАСХОДА тепла). 5. а, б (Плотность пульпы/время и производительность фабрики). 6. а, б, в (Тепловые эффекты, нагрев шихты, потери в среду).

Блок В (по 1 баллу за полное правильное соответствие) 7. А-2, Б-1, В-3 8. А-2, Б-1, В-3

Блок Г (по 1 баллу за правильную последовательность) 9. Б → Г → Д → А → В 10. Б → А → Г → В

Ключ и критерии оценивания заданий открытого типа (Блок Д) Оценивание: до 3 баллов за каждый корректно решенный кейс (максимум 15 баллов).

Кейс 11 (Восстановление цинка): Эталонное решение:

1. Масса ZnO в огарке: $100 * 0,60 * (81/65) = 74,77$ кг (или сразу через массу Zn: 60 кг Zn требует $60/65 * 12 = 11,07$ кг C теоретически).
2. С учетом степени восстановления (94%): $11,07 * 0,94 = 10,4$ кг чистого углерода.
3. Расход кокса (85% C): $10,4 / 0,85 = 12,23$ кг. *Критерии:* 1 балл за верное уравнение реакции и стехиометрию, 1 балл за учет степени восстановления, 1 балл за пересчет на состав кокса.

Кейс 12 (Конвертирование штейна и флюс): Эталонное решение:

1. Масса Fe в штейне: $50 * 0,30 = 15$ тонн.
2. Масса Fe₃O₄: $15 * 0,80 * (232 / (3*56)) = 16,57$ тонн магнетита.
3. По уравнению $3Fe_3O_4 + FeS + 5SiO_2 = \dots$ требуется 5 моль SiO₂ на 3 моль Fe₃O₄.
4. Масса SiO₂: $16,57 * (5 * 60 / (3 * 232)) = 7,14$ тонн чистого кремнезема.
5. Расход кварцевого флюса (90%): $7,14 / 0,90 = 7,93$ тонн. *Критерии:* 1 балл за расчет массы магнетита, 1 балл за стехиометрический пересчет на SiO₂, 1 балл за учет концентрации SiO₂ во флюсе.

Кейс 13 (Электроэкстракция меди): Эталонное решение:

1. Теоретическая масса Cu по закону Фарадея: $m_{теор} = 1,186 * 30000 * 24 / 1000 = 853,92$ кг.
2. Выход по току: $V_{т} = (850 / 853,92) * 100\% = 99,54\%$.
3. Потребленная мощность: $P = U * I = 0,35$ кВ * 30 кА = 10,5 кВт (на 1 ванну, но обычно считают на тонну). Затраченная энергия за 24 ч: $W = 10,5 * 24 = 252$ кВт·ч.
4. Удельный расход: 252 кВт·ч / 850 кг = 0,296 кВт·ч/кг (или 296 кВт·ч/т). *Критерии:* 1 балл за расчет теоретической массы и выхода по току, 1 балл за расчет затраченной электроэнергии, 1 балл за удельный расход.

Кейс 14 (Теплообмен и площадь кессона): Эталонное решение:

1. Массовый расход газов: $G = 50000 * 1,3 = 65000$ кг/ч.
2. Теплота, которую нужно отвести: $Q = G * C_p * \Delta T = 65000 * 1,1 * (1200 - 400) = 57200000$ кДж/ч = 15888 кВт.
3. Средний температурный напор: $\Delta T_{ср} = T_{газа} - T_{стенки}$. (Принимаем среднюю температуру газа 800 °C). $\Delta T_{ср} = 800 - 150 = 650$ К.
4. Площадь зеркала: $F = Q / (k * \Delta T_{ср}) = 15888 * 1000 / (40 * 650) = 611$ м². *Критерии:* 1 балл за расчет теплового потока Q, 1 балл за определение температурного напора, 1 балл за расчет площади F.

Кейс 15 (Схема баланса автоклавного выщелачивания): Эталонные аспекты:

1. База расчета: 1 тонна сухого концентрата.
2. Приход: Концентрат, вода (оборотная и свежая), серная кислота (если есть), сжатый воздух (кислород), известняк (CaCO_3).
3. Расход (обязательные компоненты): Раствор (сульфаты металлов, избыточная H_2SO_4), Кек (пирит, элементарная сера, нерастворимый остаток, гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Газовая фаза (отходящий воздух, пары воды, следы SO_2), Тепло (потери в среду и нагрев пульпы). *Критерии:* 1 балл за верный выбор базы и приходную часть, 1 балл за учет образования гипса и элементарной серы в кеке, 1 балл за учет газовой фазы и теплового баланса.

Итоговый подсчет баллов и перевод в шкалу оценивания:

- Максимальный балл за экзамен: 3 (Блок А) + 3 (Блок Б) + 2 (Блок В) + 2 (Блок Г) + 15 (Блок Д) = 25 баллов.
- Перевод в 4-балльную шкалу (согласно критериям ЗГУ):
 - 22–25 баллов (85–100%) = «Отлично» (5)
 - 19–21 балл (75–84%) = «Хорошо» (4)
 - 17–18 баллов (65–74%) = «Удовлетворительно» (3)
 - Менее 17 баллов (<65%) = «Неудовлетворительно» (2)