

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

/Д.С. Гуц/

«30» октября 2023 года

**ПРОГРАММА**

**вступительного испытания для поступающих в аспирантуру**

**2.6 Химические технологии, науки о материалах и металлургия**

*шифр и наименование группы научных специальностей*

**2.6.2 Металлургия черных, цветных и редких металлов**

*шифр и наименование научной специальности*

Красноярск 2023

## Введение

Настоящая программа включает материал специальных учебных дисциплин, в числе которых теория металлургических процессов, металлургическая теплотехника, металлургия черных металлов и металлургия цветных металлов.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИИ

### 1.1. Теория пирометаллургических процессов

#### *Термодинамика и кинетика процессов диссоциации химических соединений*

Термодинамика процессов диссоциации химических соединений (на примере оксидов металлов).

Конденсатный и газообразный тип диссоциации химических соединений. Давление диссоциации оксида - критерий прочности соединения металла с кислородом. Расчет величины давления диссоциации оксидов, карбонатов и т.д. Влияние фазовых переходов и понижения давления остаточных газов на прочность соединений в системах Me-O, Me-S и т.д. Диссоциация оксидов металлов, входящих в состав сложных химических соединений.

Термодинамика диссоциации высших и низших оксидов. Принцип и правило А.А. Байкова. Термодинамический анализ и фазовые диаграммы систем Fe-O и Cu-O.

Термодинамика диссоциации оксидов в системах с взаимной растворимостью Me и MeO. Термодинамика диссоциации оксидов металлов при наличии растворителя.

Кинетика и механизм диссоциации химических соединений (на примере карбонатов металлов). Условия появления и роста зародыша новой фазы в недрах старой. Автокаталитический характер процессов диссоциации химических соединений.

#### *Термодинамика и кинетика процессов горения газообразных восстановителей*

Термодинамические закономерности реагирования  $H_2$  и CO с кислородом. Термодинамические закономерности реагирования углерода с кислородом: взаимодействия C с  $O_2$ , реакция газификации углерода, взаимодействие углерода с водяным паром. Кислородный потенциал системы ( $p_{O_2}$ ).

Цепной механизм реакции горения водорода и CO в кислороде. Пределы воспламенения. Кинетика и механизм окисления графита в кислороде.

#### *Металлургические процессы, основанные на окислительно-восстановительных реакциях*

Термодинамика восстановления металлов из оксидов газами (CO,  $H_2$ ). Расчет состава равновесной газовой фазы. Влияние температуры и природы

восстанавливаемого металла на равновесие. Восстановление высших и низших оксидов.

Термодинамика восстановления металлов из оксидов углеродом (карботермия). Роль реакции газификации углерода. Аналитический и графический анализ равновесия в системе C-CO-Me-MeO-CO<sub>2</sub>.

Восстановление металлов из шлаковых расплавов. Восстановление металлов углеродом из оксидов, имеющих газообразный тип диссоциации.

Металлотермия. Классификация металлотермических процессов. Металлотермия в системах с "чистыми" и "смешанными" конденсированными фазами. Правило С.Ф. Жемчужного. Расчет полноты восстановления и содержания металла-восстановителя в металле.

Окислительное рафинирование металлов. Термодинамика процесса. Расчет остаточного содержания элементов-примесей в металле. Влияние шлакообразования на полноту рафинирования металла. Окислительное рафинирование меди от железа и никеля. Обезуглероживание стали. Окислительное рафинирование с применением химически активных добавок.

Раскисление металлов. Требования к раскислителям. Расчет остаточного содержания кислорода в металле после раскисления.

Раскисление металлов шлаками. Раскисление металлов путем их вакуумирования. Кинетика и механизм реакций восстановления металлов из соединений.

### *Металлургические шлаки*

Классификация и роль шлаков в металлургических процессах. Основность и кислотность шлаков. Катионы и анионы в шлаковых системах. Кремнекислородные комплексы в силикатных шлаках. Строение твердых шлаков. Строение оксидных расплавов. Молекулярная и ионная теория шлаковых расплавов. Теория регулярных ионных расплавов.

Макрофизические свойства жидких шлаков: плотность, вязкость, электропроводность, поверхностное и межфазное натяжение. Диффузия в шлаковых расплавах.

Диаграммы фазового равновесия двойных и тройных оксидных систем, составляющих основу шлаков черной и цветной металлургии.

### *Термодинамический анализ металлургических процессов с участием сульфидов металлов*

Свойства серы. Природа связи Me-S. Особенности диссоциации сульфидов. Фазовые диаграммы Me-S. Взаимодействия в системе Me-S-O. Теория процессов обжига, плавка сульфидных концентратов. Построение и использование изотермических диаграмм парциальных давлений для анализа равновесия в системах Me-S-O.

Взаимодействие сульфидов и оксидов металлов. Взаимодействие сульфидов с металлами и оксидами. Рафинирование металлов от серы и серой. Кинетика и механизм окисления сульфидов.

### *Ликвационное рафинирование металлов*

Ликвационные процессы в металлургии. Уравнение Стокса, границы его применимости. Ликвационное рафинирование металлов (свинца, олова). Расчет по диаграммам фазовых равновесий чистоты и выхода продуктов при ликвации. Ликвационное рафинирование металлов с применением активных добавок.

### *Рафинирование металлов кристаллизационными методами*

Особенности кристаллизации в системах с твердыми растворами, равновесная и неравновесная кристаллизация. Равновесный и эффективный коэффициент распределения примеси. Методы очистки металлов направленной кристаллизацией, уравнение связи, основные параметры процесса и их оптимизация. Сопоставительный анализ процессов направленной кристаллизации.

### *Процессы испарения и конденсации в металлургии*

Термодинамика испарения индивидуальных веществ. Уравнения Клапейрона-Клаузиуса, Томсона-Кельвина. Законы Рауля, Коновалова, Дальтона. Теплообмен и массообмен при испарении.

Перегонка двухкомпонентных жидкостей. Расчет равновесных составов жидкой и паровой фаз. Диаграммы жидкость-пар для систем с неограниченной взаимной растворимостью компонентов в жидком состоянии. Ректификация. Особенности испарения металлов в вакууме. Перегонка металлов в вакууме, ее отличительные особенности.

Испарение металлов при производстве сплавов. Потери ценных компонентов с парогазовой фазой, пути их снижения. Решение экологических проблем.

## **1.2. Теория гидрометаллургических процессов**

Термодинамика простого растворения ионных кристаллов в воде. Свойства воды как растворителя, взаимодействие ионов с молекулами воды. Энергия кристаллической решетки, теплота растворения и теплота гидратации ионов в зависимости от заряда и размера ионов.

Оценка термодинамической вероятности протекания процессов выщелачивания. Методы расчета изменения энергии Гиббса и константы равновесия для реакций растворения металлов, оксидов, сульфидов, реакций с образованием твердой фазы. Принципы построения диаграмм потенциал — рН и их использование для термодинамического анализа равновесий в системах, содержащих твердые фазы и растворы.

Кинетика и механизм процессов выщелачивания. Стадии выщелачивания, внешнедиффузионная, внутридиффузионная и кинетическая области протекания процесса. Обобщающее выражение для скорости взаимодействия в системе твердое — жидкость.

Закономерности протекания процесса во внешнедиффузионной области. Основные положения теории массопередачи. Теория пограничного слоя жидкости, примыкающего к поверхности твердого тела. Молекулярная и конвективная диффузия. Признаки протекания процесса во внешнедиффузионной области.

Закономерности протекания процесса во внутريدиффузионной области.

Зависимость скорости выщелачивания твердого вещества от наличия дефектов в его кристаллической решетке. Интенсификация процессов выщелачивания путем предварительной активации растворяемого вещества или воздействия на пульпу электромагнитными, ультразвуковыми и акустическими колебаниями.

Особенности механизма и обобщенное уравнение скорости процесса с участием газообразного реагента. Выщелачивание оксидов в растворах щелочей и кислот. Окислительное выщелачивание сульфидов. Использование бактерий для выщелачивания сульфидов, оксидов и других минералов.

Общая характеристика процессов ионного обмена. Основные характеристики сорбентов. Ионообменное равновесие. Изотермы ионного обмена. Кинетика и механизм ионного обмена. Динамика сорбции в колонках. Особенности процессов сорбции из пульп и сорбционного выщелачивания. Разделение элементов методом ионообменной хроматографии. Вытеснительная и элюентная хроматография. Ионообменные мембраны, их характеристика и электрохимические свойства. Области применения электролиза с ионитовыми мембранами.

Общая характеристика процессов экстракции, примеры их использования. Основные типы органических экстрагентов и разбавителей. Количественные характеристики экстракции. Типы экстракционных процессов. Сольватный и гидратно-сольватный механизмы экстракции. Методы определения состава экстрагируемых комплексов.

Кинетика экстракции и реэкстракции.

Классификация методов осаждения. Факторы, влияющие на растворимость труднорастворимых соединений.

Зависимость рН гидратообразования от произведения растворимости и активности ионов металла. Закономерности осаждения основных солей.

Зависимость рН выделения сульфида от значения активности иона металла в растворе, от произведения растворимости сульфида и общей концентрации сульфидной серы в растворе.

Закономерности соосаждения малорастворимых соединений. Изоморфное, адсорбционное соосаждение. Влияние условий осаждения на структуру образующихся осадков. Старение осадков.

Области применения кристаллизации в гидрометаллургии.

Системы вода—соль, вода—соль(1)—соль(2)м, треугольная и прямоугольная диаграммы для изображения трехкомпонентных солевых систем. Степени свободы и типы трехкомпонентных систем с общим ионом.

Фазовая диаграмма растворимости, способы создания пересыщенных растворов, факторы и количественные характеристики их устойчивости.

Механизм образования зародышей кристаллизации. Гомогенное и гетерогенное зародышеобразование Механизм роста кристаллов. Кинетика, стадии процесса, уравнение скорости массовой кристаллизации. Поведение примесей при осаждении и кристаллизации.

Понятие о выделении металлов цементацией. Термодинамические, кинетические процессы и механизм цементации. Побочные процессы при цементации.

Термодинамика процесса осаждения металлов газами-восстановителями. Особенности термодинамики процесса при выделении металла из аммиачных растворов. Кинетика и механизм восстановления ионов металлов водородом до элементарной формы, до соединений низшей валентности.

### **1.3. Теория электрометаллургических процессов**

#### *Электродвижущие силы и электродные потенциалы*

Возникновение скачка потенциалов и двойного электрического слоя на границе металл-электролит. Теория строения двойного электрического слоя. Электрокапиллярные явления. Гальванические элементы. Термодинамика гальванического элемента. Классификация электродов. Электроды сравнения. Электродные потенциалы, ряд напряжений металлов. Кинетика электродных процессов. Перенапряжение электродов, основные виды. Электрохимическое перенапряжение. Концентрационное перенапряжение. Фазовое перенапряжение.

#### *Электролиз*

Катодные и анодные процессы. Характеристики электролиза, совместный разряд ионов (термодинамическая и кинетическая оценка).

#### *Особенности электрохимии расплавленных сред*

Растворимость в расплавленных солях металлов и газов. Термодинамика гальванических элементов в расплавленных солях. Электроды сравнения, потенциал электрода и ряд напряжений в расплавленных солях. Кинетика электродных процессов в расплавах. Катодный выход по току и потери металла. Механизм потери металла. Выход по току при совместном разряде ионов на катоде. Анодный эффект, сущность и механизм возникновения.

Особенности процессов на электродах в расплавленных солях. Основы высокотемпературной электрометаллургии цветных металлов.

### **1.4. Основы теории металлургической теплотехники**

#### *Техническая термодинамика*

Первый и второй законы термодинамики. Термодинамика рабочего тела. Термодинамика открытых систем. Термодинамика теплосиловых установок.

### *Механика жидкостей и газов*

Статика и динамика идеальной жидкости. Динамика реальной жидкости. Режимы движения. Уравнения Навье-Стокса и Бернулли и их использование для расчета напорных трубопроводов и систем эвакуации продуктов сгорания. Элементы теории пограничного слоя. Турбулентность пристеночная и свободная.

Струйное движение газов. Свободные, частично ограниченные и ограниченные струи. Струи изотермические и неизотермические. Элементы теории факела.

Газодинамика плотного и взвешенного слоев. Особенности движения газов; общая постановка задачи; расчет полей скоростей и давлений в слое.

### *Тепло- и массообмен*

Стационарные и нестационарные процессы теплообмена. Основные дифференциальные уравнения переноса тепла и массы. Молекулярная теплопроводность и диффузия. Тройная аналогия. Краевые условия.

Конвективный тепло- и массообмен. Вынужденная и естественная конвекция. Основные уравнения конвективного тепло- и массопереноса для вынужденного и свободного движения. Использование теории подобия для исследования процессов конвективного тепло- и массопереноса.

Передача тепла теплопроводностью в твердых телах. Дифференциальное уравнение теплопроводности и постановка общей задачи теплопроводности. Теплопроводность при стационарном и нестационарном режиме. Теоретические основы нагрева металла.

## **2. ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ**

### **2.1. Подготовка шихтовых материалов**

#### *Дробление и измельчение*

Цель и характеристика процессов. Способы дробления и измельчения. Устройство и принцип работы дробилок для крупного, среднего и мелкого дробления. Мельницы для измельчения материалов. Устройство и принцип работы барабанных мельниц.

#### *Грохочение и классификация*

Цель и способы разделения сыпучих материалов по крупности. Устройства и принцип работы грохотов и типы. Теоретические основы классификации. Устройство классификаторов и их типы.

#### *Обогащение руд*

Физические основы и показатели процесса обогащения. Методы обогащения рудного сырья. Устройство аппаратов для обогащения руд. Обезвоживание концентратов мокрого обогащения.

### *Усреднение шихтовых материалов*

Цель и показатели усреднения. Методы усреднения химического состава и физических свойств руд при добыче, на складах, в бункерах.

### *Окускование мелких руд и концентратов*

Общее представление об агломерационном процессе, его схема. Характеристика компонентов агломерационной шихты, подготовка ее к спеканию, смешивание и окомкование, загрузка на спекательные тележки. Зажигание шихты и ход процесса спекания, его показатели. Изменение температуры и других характеристик процесса во времени и по высоте спекаемого слоя.

Схема производства окатышей: подготовка материалов, состав шихты, получение сырых окатышей, обжиг окатышей – сушка, подогрев, обжиг, охлаждение. Схема газовых потоков обжиговой машины и тепловые зоны обжига.

## **2.2. Производство чугуна**

### *Характеристика железных руд*

Железорудные минералы. Требования к качеству железных руд. Требования, предъявляемые к железорудному сырью со стороны доменной плавки.

### *Комплексные руды*

Основные рудные минералы и типы комплексных руд. Требования черной металлургии к комплексным рудам.

### *Топливо доменной плавки*

Требования, предъявляемые к доменному топливу. Процесс производства кокса, устройство коксовых печей (батарей), технология коксохимического производства. Качество доменного кокса: технический анализ, физические и механические свойства. «Заменители» кокса в доменной плавке: природный газ, коксовый газ, мазут, пылеугольное топливо, их состав и характеристика.

### *Флюсы доменной плавки*

Роль флюсов в доменной плавке. Типы флюсов: основные, кислые, глиноземистые. Требования к химическому составу флюсов. Заменители руд и флюсов. Возможность замены руд и флюсов отходами различных производств.

### *Восстановительные процессы в доменной печи*

Восстановление оксидов железа. Прямое и косвенное восстановление. Влияние соотношения степеней прямого и косвенного восстановления на расход кокса в доменной плавке. Восстановление оксидов железа водородом.



Восстановление в доменной печи марганца, кремния, фосфора и других элементов. Факторы, способствующие или затрудняющие восстановление этих элементов.

#### *Десульфурация чугуна*

Источники поступлений серы в доменную печь, ее поведение в различных зонах печи. Распределение серы между чугуном, шлаком и газом. Основная реакция перехода серы из чугуна в шлак. Факторы, способствующие протеканию этой реакции.

#### *Образование чугуна и шлака*

Размягчение железорудных материалов при нагревании. Процесс науглероживания железа. Первичный и конечный шлак. Влияние химического состава шлака на его температуру плавления и вязкость.

#### *Устройство и оборудование доменных печей и цехов*

Доменная печь. Огнеупорная футеровка. Охлаждение печи. Устройство леток и фурменных приборов. Устройства для загрузки шихтовых материалов в печь: бункерная эстакада, оборудование для сортировки компонентов шихты их взвешивания и подачи на колошник.

### **2.3. Сталеплавильное производство**

#### *Очистка от примесей. Кристаллизация и разливка стали*

Окисление примесей сталеплавильной ванны. Термодинамика окисления углерода. Концентрация углерода и кислорода в стальной ванне в процессе плавки.

#### *Раскисление стали*

Термодинамика раскисления стали. Раскислительная способность отдельных раскислителей. Раскисление комплексными раскислителями.

Удаление неметаллических включений из металла.

#### *Газы в стали и методы борьбы с ними*

Водород в стали, его влияние на свойства стали. Растворимость водорода в железе и стали, влияние температуры, аллотропических превращений и химического состава на растворимость водорода.

Растворимость азота в железе и его сплавах, влияние на нее температуры и состава сплава. Поведение азота в ваннах сталеплавильных агрегатов (кислородных конвертерах, мартеновских, двухванных и дуговых печах).

#### *Особенности производства стали в различных сталеплавильных агрегатах.*

#### *Кислородно-конвертерный процесс*

Реакционная зона конвертера, ее температурный режим, образование бурого дыма, окислительные процессы в реакционной зоне, роль

реакционной зоны в процессах шлакообразования, теплообмен в реакционной зоне.

Окисление углерода.

Окисление шлакообразующих компонентов ванны.

Поведение серы в кислородно-конвертерном процессе.

Аргонокислородная продувка. Получение нержавеющей стали в конвертерах.

Качество кислородно-конвертерной стали в сравнении с мартеновской и электросталью. Пути дальнейшего совершенствования кислородно-конвертерного процесса и повышение качества стали.

### *Электросталеплавильное производство*

Основные условия обезуглероживания. Обезуглероживание высокохромистых и высокомарганцовистых расплавов. Особенности получения слаборазоглеродистых сталей в дуговой печи внепечными методами.

Современные методы проведения восстановительного периода в основной печи. Оптимальный режим раскисления. Основные пути сокращения восстановительного периода. Выплавка стали в электродуговых печах с кислой футеровкой.

Открытая и вакуумная индукционная плавка.

Вакуумный дуговой переплав.

Электрошлаковый переплав.

Плазменная плавка и плазменно-дуговой переплав.

Электронно-лучевой переплав.

### *Теория и практика внепечной обработки стали*

Неравномерность состава и температуры металла в ковше. Способы гомогенизации металла: продувка аргоном и электромагнитное перемешивание. Дегазация и удаление включений при гомогенизации. Кавитационная продувка.

Десульфурация стали в ковше: обработка синтетическими шлаками и продувка порошками. Сульфидная емкость шлаков. Механизм процессов десульфурации при продувке порошкообразными материалами. Управление процессами десульфурации. Варианты безокислительной дефосфорации стали.

Раскисление и дегазация стали в вакууме. Способы вакуумирования и их сравнительная эффективность. Вакуумное обезуглероживание. Влияние вакуумирования на качество стали.

Проблема непрерывных процессов производства стали. Технологические преимущества непрерывных процессов в сравнении с периодическими.

## **2.4. Технология производства тяжелых цветных металлов**

Общие принципы извлечения меди, никеля, свинца, цинка из руд и концентратов.

Термодинамика, кинетика и механизм окисления сульфидов в твердом и жидком состоянии. Диссоциация высших сульфидов при нагревании в нейтральной атмосфере.

Основные стадии формирования металлургических расплавов (шлака, штейна, шпейзы).

Способы извлечения серы при пирометаллургической переработке сульфидного сырья. Поведение редких и рассеянных элементов в основных пирометаллургических процессах. Распределение мышьяка по продуктам плавки.

Коэффициент комплексности использования сырья в металлургии меди, никеля, свинца, цинка.

### *Переработка медных руд и концентратов*

Разновидности отражательной плавки. Ее удельный вес в производстве меди. Целесообразность предварительного обжига концентратов перед плавкой. Преимущества и недостатки переработки конвертерных шлаков в отражательной печи. Характеристика штейнов, шлаков, газов. Тепловой КПД. Возможные способы утилизации тепла. Выбросы в окружающую среду.

Переработка штейнов на черновую медь. Поведение его составляющих в I и II периоды конвертирования. Тепловой и температурный режимы процесса. Использование воздуха, обогащенного кислородом. Показатели процесса.

Автогенные процессы в металлургии меди. Их преимущества и недостатки. Влияние магнетита на потери меди со шлаком в этих процессах. Распределение серы и металлов-спутников по продуктам плавки.

Огневое и электролитическое рафинирование меди. Теоретические основы. Переработка анодных шламов. Практика процессов.

Гидрометаллургия меди. Подготовка сырья к гидрометаллургической переработке. Химизм основных реакций выщелачивания. Практика кучного, бактериального и автоклавного выщелачивания.

### *Переработка никелевых руд и концентратов*

Способы подготовки окисленных никелевых руд к плавке в шахтных печах. Их преимущества и недостатки. Реакции, протекающие по высоте шахты печи и во внутреннем горне. Характеристика штейнов и шлаков шахтной плавки.

Конвертирование никелевых штейнов. Поведение кобальта. Современные способы переработки конвертерных шлаков в целях извлечения из них кобальта. Их преимущества и недостатки. Переработка файнштейна до огневого никеля.

Схема производства металлургического кобальта.

Подготовка окисленных никелевых руд к плавке в электропечах на ферроникель. Теория и практика плавки. Рафинирование черного ферроникеля.

Гидрометаллургические и комбинированные способы комплексной переработки окисленных и никелевых руд (сегрегационные, автоклавные, аммиачно-карбонатные и др.)

Подготовка сульфидных руд и концентратов к плавке в электрических печах. Теория и практика электроплавки.

Особенности конвертирования медно-никелевых штейнов. Разделение фанштейна. Способы переработки медного и никелевого концентратов, полученных при флотации фанштейна. Отличия технологической схемы производства кобальта при переработке сульфидного и окисленного сырья.

Карбонильный процесс получения никеля. Гидрометаллургические и комбинированные способы комплексной переработки сульфидных руд и концентратов. Методы получения никеля и кобальта из растворов; электролиз, водородное восстановление.

Поведение селена, теллура и драгоценных металлов по главным пределам технологических схем.

### *Переработка свинцовых концентратов*

Агломерирующий обжиг свинцовых концентратов. Теория и практика.

Восстановительная плавка свинцового агломерата. Химизм процесса. Поведение свинца и металлов-спутников при плавке.

Рафинирование черного свинца и переработка полупродуктов. Теория и практика.

Способы переработки шлаков, пыли.

Автогенные и гидрометаллургические способы переработки свинцовых концентратов. Их преимущества и недостатки, перспективы применения ценных металлов-спутников в производстве свинца. Схемы попутного извлечения серы и металлов-спутников при переработке свинцовых концентратов. Пылеулавливание. Методы и оборудование пылеулавливания. Показатели работы пылеуловителей.

Техника безопасности при производстве свинца и охрана окружающей среды.

### *Переработка цинковых концентратов*

Обжиг цинковых концентратов.

Пирометаллургические методы получения цинка из огарка. Электротермия цинка. Особенности выплавки цинка в шахтных печах.

Рафинирование черного цинка.

Гидрометаллургия цинка. Выщелачивание цинковых огарков и очистка растворов от примесей. Теоретические основы этих процессов. Электроосаждение цинка.

## **2.5. Технология производства золота, серебра и металлов платиновой группы**

Извлечение благородных металлов амальгамацией.

Термодинамика, механизм и кинетика взаимодействия золота, серебра и металлов платиновой группы с ртутью.

Теоретические основы и технология процесса цианирования.

Термодинамика и кинетика растворения в цианистых растворах золота, серебра, теллуридов золота, сернистых и оксидных минералов серебра.

Термодинамика и кинетика процесса осаждения золота и серебра из цианистых растворов цинком и алюминием. Теоретические основы сорбции золота и серебра из цианистых растворов активированным углем, ионно-обменными смолами (анионитами) и жидкостной экстракцией органическими растворителями. Современное состояние и направления дальнейшего развития техники и технологии цианистого процесса.

Аффинаж золота, серебра и металлов платиновой группы.

Теоретические основы и технология электролитического аффинажа золота и серебра.

Химия и технология процессов аффинажа платинового концентрата и методы получения платины высокой чистоты.

## **2.6. Технология производства легких цветных сплавов**

### *Получение магния*

Свойства и применение магния. Характеристика исходных материалов. Теория и технология получения безводного хлористого магния и бинифита. Обезвоживание карналлита: получение искусственного карналлита, обезвоживание во вращающихся СКН и печах. Применение печей кипящего слоя и хлораторов.

Состав и физико-химические свойства электролитов. Особенности кинетики электродных процессов. Гидродинамика электрода и катодный выход по току. Влияние примесей и добавок в электролит на катодный процесс. Образование шлама. Техника электролитического получения магния. Конструкция электролизеров. Устройство цехов электролиза, отсос хлора и катодных газов. Рафинирование магния-сырца переплавкой с флюсами. Электролитическое рафинирование магниевых ломов и отходов.

### *Получение алюминия*

Свойства алюминия и сплавов на его основе, масштабы производства и области применения. Основные руды алюминия.

Переработка бокситов гидрохимическим способом. Основная реакция Байера. Строение алюминатных растворов. Равновесие в системе  $Al_2O_3$ — $Na_2O$ — $H_2O$ . Принципиальная технологическая схема способа Байера. Технологические параметры основных переделов и характеристика оборудования.

Получение глинозема способом спекания из бокситов. Основные химические реакции при спекании и выщелачивании спеков. Принципиальная технологическая схема способа спекания. Комбинированные способы: гидрохимический и спекания – параллельный и последовательный варианты.

Комплексная переработка нефелинов. Характеристика нефелинов и нефелиноспенитовых руд. Основные реакции при спекании нефелина с известняком и выщелачивании. Принципиальная технологическая схема способа спекания. Основная аппаратура.

Производство фтористых солей и электродов. Производство криолита кислотным способом: основные реакции, технологическая схема и аппаратура.

Производство электродов: исходные материалы, прессование, обжиг «зеленых» электродов, графитирование.

Теория электролиза криолитоглиноземных расплавов. Свойства и строение электролитов и термодинамика основных реакций на электродах. Основные диаграммы состояния. Механизм катодного процесса, поведение натрия в катодном разряде, катодный выход по току. Анодный процесс. Потенциалопределяющие реакции, состав анодных газов, связь с катодным выходом по току. Расход углерода, связь с анодным перенапряжением. Анодный эффект, поведение примесей и добавок в электролите.

Технология электролитического получения алюминия. Конструкции электролизеров и сравнение их технических данных. Пуск ванн, их обслуживание. Нарушение нормальной работы электролизеров. Влияние электромагнитных сил на работу электролизеров.

Технология самообжигающегося анода алюминиевого электролизера. Характеристика основных зон в аноде; требования, предъявляемые к пекам и коксам; основные процессы, протекающие в различных зонах анода; баланс углерода.

Энергетические балансы электролизеров, связь между плотностью тока и удельными потерями тепла.

Планировка цехов электролиза и электролизных корпусов. Газоотсос и вентиляция, регенерация фторсолей.

Электролитическое рафинирование алюминия. Свойства и применение алюминия высокой чистоты. Теория и технология трехслойного метода, пути ее совершенствования.

Физико-химические основы выплавки алюминиево-кремниевых сплавов из руд: термодинамика процессов восстановления оксидов алюминия и кремния углеродом, роль низших оксидов алюминия и кремния. Техника электротермического получения сплавов алюминия и кремния: подготовка шихты, характеристика электропечей.

## **2.7. Технология производства редких**

### *Тугоплавкие редкие металлы*

Вольфрам и молибден. Физико-химические основы пирометаллургических и гидрометаллургических способов разложения рудных концентратов, их критическое сопоставление. Теоретические основы и практика процессов производства чистых триоксидов молибдена и вольфрама.

Использование ионообменных и экстракционных процессов в гидрометаллургии вольфрама и молибдена. Схемы комплексной переработки вольфрам-молибденовых концентратов. Способы отделения молибдена от вольфрама. Попутное извлечение рения при переработке молибденовых концентратов.

Термодинамика, кинетика и механизм восстановления трехоксидов вольфрама и молибдена водородом, практика процесса. Основы производства компактных вольфрама и молибдена методом порошковой металлургии и плавкой (дуговой, электронно-лучевой). Влияние примесей на свойства металлов. Варианты процессов получения вольфрама и молибдена восстановлением галогенидов. Методы получения монокристаллов вольфрама и молибдена.

Тантал и ниобий. Обзор и сопоставление способов разложения рудных концентратов различного типа (танталит-колумбит, лопарит, пирохлор). Физико-химические основы процессов. Сопоставление хлорной и сульфатной технологии комплексной переработки лопарита. Основы способов разделения тантала и ниобия.

Обзор и сопоставление способов производства тантала и ниобия. Физико-химические основы металлургического, карботермического и электролитического способов. Получение тантала и ниобия восстановлением хлоридов. Физико-химические основы различных способов производства компактных тантала и ниобия.

Титан, цирконий и гафний. Основы современной технологии производства четыреххлористого титана. Обзор и сопоставление способов получения искусственного рутила из ильменитовых концентратов.

Физико-химические основы способов вскрытия циркониевых концентратов. Обоснование выбора способа вскрытия в зависимости от требуемых конечных продуктов. Способы разделения циркония и гафния.

Комплексное использование титанового и циркониевого сырья.

Общий обзор способов получения титана и циркония с учетом особенностей свойств этих металлов.

Физико-химические свойства и практика магнийтермического способа производства титана и циркония из этих хлоридов. Варианты натрийтермического восстановления четыреххлористого титана. Сопоставление магнийтермического и натрийтермического процессов. Электролитический способ получения циркония.

Электролитическое рафинирование титана. Основы йодидного способа рафинирования титана и циркония.

Производство компактных титана и циркония методом плавки.

Порошковая металлургия титана и циркония.

### *Рассеянные редкие металлы*

Общая характеристика рассеянных редких металлов, источников их получения. Технология попутного извлечения галлия в производстве глинозема, индия при переработке сульфидного сырья цветных металлов,

германия при переработке медного сырья и углей, рения в производстве меди и молибдена.

#### *Редкоземельные металлы*

Основы процессов получения редкоземельных металлов высокой чистоты. Варианты технологических схем переработки моноцитовых концентратов с получением соединений редкоземельных металлов и тория. Технология переработки других видов редкоземельного сырья (бастензит, иттропаризит, лопарит). Основы способов разделения редкоземельных металлов и тория.

#### *Легкие редкие металлы*

Бериллий. Физико-химические основы технологии переработки бериллиевых концентратов по сульфатной и фторидной схемам. Способы получения чистого оксида бериллия и галогенидов бериллия.

Металлотермические и электротермические способы получения бериллия, дистилляционные и электролитические процессы его рафинирования. Производство компактного бериллия.

Литий. Основы технологии производства соединений лития из литиевых концентратов (сподумена, лепидолита).

Физико-химические основы процессов получения лития электролизом, вакуум-термическим способом. Способы рафинирования лития.



## Список рекомендованных источников

### Основная литература

1. Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М. Вольдман, А.Н. Зеликман - М.: Metallurgy, 2003. – 464 с.
2. Зеликман А.Н., Metallurgy редких металлов / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов. - М.: Metallurgy, 1991.
3. Исаева, Л.А. Теория электрометаллургических процессов: учеб. пособие / Л.А. Исаева, Ю.Г. Михалев. – Красноярск: ГОУ ВПО "Гос. ун-т цвет, металлов и золота", 2006. - 156 с.
4. Марченко, Н. В. Metallurgy тяжелых цветных металлов: учеб. пособие / Н. В. Марченко, Е. П. Вершинина, Э. М. Гильдебрандт. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. - 388 с.
5. Metallurgy чугуна: Учебник для вузов. 3 – е изд. Перераб. и доп./Под. ред. Ю.С.Юсфина.- М.: ИКЦ «Академкнига», 2004.
6. Погодаев, А.М. Основы теории пирометаллургических процессов / А.М. Погодаев, И.А. Погодаева. – Красноярск: ГУЦМиЗ, 2004. - 136 с.
7. Процессы и аппараты цветной металлургии / С.С. Набойченко [и др.] Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2013. – 564 с.
8. Стрижко, Л.С. Metallurgy золота и серебра: учеб. пособие для вузов / Л.С. Стрижко. – М.: МИСиС, 2001. - 336 с.
9. Теплотехника металлургического производства. Т 1. Теоретические основы / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. – М.: Изд-во МИСиС, 2002.
10. Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печи / В.А. Кривандин, В.В. Белоусов, Г.С. Сборщиков и др. – М.: Изд-во МИСиС, 2002.

### Дополнительная литература

1. Борбат, В.Ф. Metallurgy платиновых металлов / В.Ф. Борбат. – М.: Metallurgy, 1977.
2. Зеликман, А.Н. Metallurgy редких металлов / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов. – М.: Metallurgy, 1991.
3. Николаев, И.В. Metallurgy легких металлов / И. В. Николаев, В.И. Москвитин, Б.А. Фомин. – М.: Metallurgy, 1997.
4. Процессы и аппараты цветной металлургии / С.С. Набойченко, Н.Г. Агеев, В.П. Дорошкевич и др. – Екатеринбург: УГТУ - УПИ, 1997.
5. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер и др. – М.: Metallurgy, 1978.
6. Теория и технология электрометаллургических процессов / Ю.В. Борисоглебский, М.М. Ветюков, В.И. Москвитин, С.Н. Школьников; Под ред. М.М. Ветюкова. – М.: Metallurgy, 1994.
7. Автогенные процессы в цветной металлургии / В.В. Мечев, В.П. Быстрое, А.В. Тарасов и др. – М.: Metallurgy, 1991.

8. Металлургия стали / Под ред. В.И. Явойского и Ю. В. Кряковского. – М.: Metallurgia, 1983.

9. Металлургия стали / Под ред. В.И. Явойского и Г.Н. Ойса. – М.: Metallurgia, 1973.

10. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др. – М.: Metallurgia. 1989.

Программа соответствует паспорту номенклатуры специальностей научных работников.

Составитель программы:  
д-р хим. наук, профессор

Н.В. Белоусова

Директор Института  
цветных металлов и материаловедения

В.Н. Баранов