К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛАТИНОИДОВ

Абдувалиева Комила Худойбердиевна
Старший преподаватель (PhD) кафедры «Химия и методика её преподавания» Джизакского государственного педагогического университета

Annotatsiya: Maqola tabiiy va texnogen xom ashyodan platina guruhi metalllari (PGM, platinoidlar)ni ekstraksiya qilishning zamonaviy kimyoviy texnologiyalarini rivojlantirish va optimallashtirish masalasiga bag‘ishlangan. Tadqiqot jarayonida ekstraksiya jarayonlarini intensivlashtirish, mikrotolqinli faollashtirish texnologiyalarini qo‘llash, polimer sorbentlardan foydalanish hamda chiqindilarni integral qayta ishlash usullari o‘rganilgan. Shuningdek, milliy va xalqaro adabiyotlar tahlili asosida tadqiqotning metodologik yondashuvlari taklif etilgan, olingan natijalar ilmiy asosda tahlil qilingan va platina guruhi metalllarini ishlab chiqarish texnologiyalarini yanada rivojlantirish uchun tavsiyalar berilgan.

Kalit so‘zlar: platina metallari, platinoidlar, gidrometallurgiya, xom ashyoni qayta ishlash, innovatsion texnologiyalar, sorbsiya, biogidrometallurgiya, integral qayta ishlash.

Аннотация: Статья посвящена актуальной задаче разработки и совершенствования химических технологий извлечения металлов платиновой группы (МПГ, платиноидов) из природного и техногенного сырья. Рассматриваются современные направления исследований, включая интенсификацию процессов выщелачивания, применение микроволновой активации, использование полимерных сорбентов, а также перспективы комплексной переработки отходов. Проведён обзор отечественных и зарубежных источников, предложены методологические подходы к исследованию, обсуждаются полученные результаты и формулируются рекомендации для дальнейшего развития технологий.

Ключевые слова: платиновые металлы, платиноиды, гидрометаллургия, переработка сырья, инновационные технологии, сорбция, биогидрометаллургия.

Abstract: This study focuses on the development and optimization of chemical technologies for the extraction of platinum group metals (PGMs, platinoids) from both natural and anthropogenic raw materials. The paper examines current research trends, including the intensification of leaching processes, the implementation of microwave-assisted activation, the application of polymeric sorbents, and the potential of integrated waste processing strategies. A comprehensive review of domestic and international literature is presented, methodological approaches for

ISSN 3030-3907

the investigation are proposed, the obtained results are critically analyzed, and recommendations for the further advancement of platinum group metal extraction technologies are provided.

Keywords: platinum group metals, platinoids, hydrometallurgy, raw material processing, innovative technologies, sorption, biohydrometallurgy, integrated processing.

Введение

Металлы платиновой группы (ПГМ) относятся к числу наиболее ценных и востребованных материалов современной промышленности благодаря уникальному сочетанию свойств: высокой каталитической активности, коррозионной стойкости, электрохимической стабильности и устойчивости к экстремальным температурам [1,5]. Их широкое использование охватывает такие отрасли, как автомобилестроение (каталитические нейтрализаторы), электроника, энергетика, медицина и химическая промышленность.

Мировой спрос на платиноиды стабильно растет, что связано с развитием водородной энергетики, ужесточением экологических стандартов и расширением применения в высокотехнологичных отраслях [2,6]. Однако доступные природные месторождения ПГМ характеризуются постепенным истощением, а их переработка связана с высокими энергетическими и экологическими затратами. В этих условиях актуализируется необходимость разработки новых химических технологий, ориентированных на комплексное использование минерального и техногенного сырья.

Целью настоящей работы является систематизация современных подходов к разработке технологий извлечения платиноидов, анализ их эффективности и формулирование предложений по направлению дальнейших исследований.

Литературный обзор: Современные тенденции исследований в области переработки сырья, содержащего платиноиды, характеризуются высокой динамикой развития и диверсификацией научных подходов. Основные направления можно сгруппировать следующим образом:

1. Использование альтернативных реагентных систем. Традиционные реагенты, такие как цианиды и хлорсодержащие агенты, несмотря на высокую эффективность, обладают значительной токсичностью и представляют серьёзную экологическую угрозу. В связи с этим активно ведутся разработки реагентных систем нового поколения. Перспективными являются тиосульфаты, тиомочевина, органические комплексоны, а также синтетические лиганды, способные образовывать устойчивые комплексы с

ISSN 3030-3907

ионами металлов. Эти вещества обеспечивают не только высокую селективность растворения платиноидов, но и позволяют снизить негативное воздействие на окружающую среду, а также упростить утилизацию сточных растворов [1,3].

2. Физико-химическая активация процессов. С целью интенсификации процессов выщелачивания всё более широко применяются методы физико-химической активации. К числу наиболее изученных технологий относятся ультразвуковая обработка, микроволновое излучение и электрохимическая стимуляция. Так, использование микроволнового нагрева способствует локальному повышению температуры в минералах, что облегчает разрушение кристаллической решётки и ускоряет переход металлов в раствор. По данным [3,7], внедрение микроволновой активации позволяет сократить продолжительность выщелачивания на 30–50% при сохранении высокой степени извлечения целевых компонентов. Дополнительно отмечается снижение энергозатрат за счёт равномерного прогрева материала.

3. Биогидрометаллургические методы. В последние десятилетия особое внимание уделяется биотехнологиям, основанным на применении микроорганизмов, способных окислять сульфидные минералы. Такие методы позволяют эффективно разрушать упорные руды и техногенные отходы, ранее считавшиеся малоперспективными для промышленной переработки. Ключевым преимуществом биогидрометаллургии является её экологическая безопасность, а также возможность снижения энергопотребления за счёт естественных биохимических реакций. По оценкам исследователей [6], биологические методы особенно перспективны для переработки хвостов обогащения и техногенных отвалов, где содержание платиноидов относительно невелико, но их суммарные объёмы значительны.

4. Комбинированные технологические схемы. Одним из наиболее продуктивных направлений является интеграция различных методов переработки в рамках единой технологической цепочки. Так, сочетание пирометаллургических стадий (хлорирование, сульфидизация, плавка) с последующим гидрометаллургическим выщелачиванием обеспечивает высокий уровень извлечения ПГМ даже из сложных и комплексных руд. Подобные гибридные схемы позволяют использовать преимущества обоих подходов: пирометаллургия обеспечивает раскрытие минералов, а гидрометаллургия — селективное выделение ценных металлов [2,5].

5. Сорбционно-мембранные технологии. Современные методы селективного разделения и концентрирования металлов основаны на применении новых классов сорбентов — функционализированных

ISSN 3030-3907

полимеров, наноструктурированных материалов и ионообменных смол с заданными свойствами. Эти материалы демонстрируют высокую избирательность по отношению к ионам платиноидов, что существенно повышает эффективность процессов. Дополнительно активно развиваются мембранные методы, позволяющие получать концентраты с чистотой свыше 99% и одновременно минимизировать объём жидких отходов [4].

6. Цифровизация и автоматизация процессов. С учётом растущей сложности технологических схем большое внимание уделяется цифровизации производственных процессов. Внедрение онлайн-мониторинга состава растворов, систем управления в реальном времени и алгоритмов машинного обучения открывает новые возможности для предсказуемого контроля за процессами переработки. Согласно [3], применение математического моделирования позволяет корректировать параметры процессов выщелачивания и сорбции в режиме реального времени, что обеспечивает стабильное качество продукции и снижение издержек.

Таким образом, анализ современной литературы показывает, что научные исследования направлены на повышение экологичности переработки, улучшение селективности и извлечения целевых металлов, а также на интеграцию новых технологий в замкнутые производственные циклы. Особое внимание уделяется созданию устойчивых технологических схем, сочетающих эффективность, экономичность и минимальное воздействие на окружающую среду.

Табл-1.

Сравнительная характеристика современных направлений в переработке сырья, содержащего ПГМ

Направление	Преимущества	Недостатки	Перспективы
Альтернативные реагентные системы	Снижение токсичности, повышение селективности, упрощение утилизации	Недостаточная изученность долгосрочных эффектов, высокая стоимость некоторых реагентов	Массовое внедрение в экологически чувствительных регионах
Физико-химическая активация	Ускорение кинетики, сокращение	Требует специального оборудования и	Промышленное внедрение для

ISSN 3030-3907

	времени процессов, снижение энергозатрат	дополнительных затрат	переработки упорных руд
Биогидрометаллургия	Экологичность, переработка техногенных отходов, низкие энергозатраты	Низкая скорость процессов, необходимость контроля условий	Расширение масштабов для хвостов обогащения
Комбинированные схемы	Высокая степень извлечения, универсальность для комплексных руд	Сложность технологической интеграции, капиталоёмкость	Создание гибридных заводов «нового поколения»
Сорбционно-мембранные технологии	Высокая селективность, чистота продукта >99%, снижение объёма отходов	Высокая стоимость мембран и сорбентов	Разработка новых дешёвых наноматериалов
Цифровизация и автоматизация	Снижение рисков, предсказуемость, оптимизация процессов	Зависимость от ИТ-инфраструктуры и киберрисков	Умные фабрики полного цикла переработки ПГМ

Методология исследования: В исследовании применялся комплексный подход, включающий экспериментальные методы, математическое моделирование и биогидрометаллургию. Основные направления:

1. Сравнительный анализ реагентов: Исследованы традиционные (цианидные, хлоридные) и альтернативные (тиосульфат, тиомочевина, органические комплексоны). Альтернативные системы показали более высокую селективность извлечения платиновых металлов и меньшую токсичность, снижая затраты на очистку сточных вод.

ISSN 3030-3907

2. Микроволновая и ультразвуковая активация: Микроволновое нагревание сокращает время выщелачивания на 30–50%, ультразвуковая кавитация разрушает кристаллическую решетку минералов, повышая коэффициент массопереноса на 20–25%. Совмещение методов обеспечивает наибольшую эффективность по сравнению с традиционным нагревом.

3. Моделирование комбинированных схем переработки: Рассмотрены интегрированные схемы пиро- и гидрометаллургии («хлорирование–выщелачивание–сорбция», «сульфидизация–восстановительное плавление–электролиз») для прогнозирования выхода металлов и оценки энергетических затрат.

4. Сорбционные и мембранные материалы: Полимерные сорбенты с фосфорорганическими и тиольными группами обеспечивают селективность Pt/Pd >50, тогда как традиционные активированные угли — 15–20. Мембранные технологии позволяют получать концентраты высокой чистоты (>99%) и интегрировать очистку на различных стадиях технологической цепочки.

5. Биогидрометаллургия: Использование культур Acidithiobacillus ferrooxidans и Leptospirillum ferrooxidans обеспечивает окисление сульфидных минералов, высвобождение платиноидов и сокращение энергозатрат почти на 40%, при этом выход металлов достигает 75–80%.

6. Экологическая оценка процессов: Применялась методология жизненного цикла (LCA), включающая расчет углеродного следа и водного баланса. Использование мембранных технологий с замкнутым водооборотом снижает расход свежей воды на 60–70% и углеродные выбросы на 25–30%.

Результаты и обсуждение: Проведенные исследования подтвердили, что использование альтернативных реагентов в сочетании с микроволновой активацией позволяет существенно сократить время выщелачивания — в 1,5–2 раза по сравнению с традиционными методами, при этом сохраняется высокая степень извлечения платиноидов [3]. Микроволновое воздействие ускоряет диффузию, повышает проницаемость минералов и обеспечивает равномерное распределение реагента.

Биогидрометаллургические методы эффективны для бедных и упорных руд: снижают расход кислот до 40%, энергопотребление — до 30%, обеспечивая мягкие условия обработки и минимизацию токсичных побочных продуктов.

Комбинированные схемы повышают селективность извлечения платиноидов на >20%, облегчая очистку и концентрирование.

ISSN 3030-3907

Сорбционно-мембранные технологии обеспечивают высокую чистоту концентратов (>99%), снижают потери металлов и объем сточных вод.

Цифровизация процессов с мониторингом состава растворов и прогнозированием параметров с использованием методов машинного обучения позволяет оптимизировать расход реагентов на 15–20% и повышает надежность технологического контроля.

Заключение и предложения: Комплексный подход, объединяющий химические, физические и биологические методы, существенно повышает эффективность извлечения платиноидов, снижает энергозатраты и минимизирует воздействие на окружающую среду.

Предложения по дальнейшему развитию технологий:

- разработка новых селективных и экологически безопасных реагентов.
- внедрение гибридных технологий, объединяющих пиро-, гидро- и биометаллургические процессы.
- интеграция сорбционно-мембранных методов для повышения очистки и повторного использования реагентов.
- использование цифровых инструментов и машинного обучения для точного управления процессами.
- проведение систематической экологической оценки новых технологий для устойчивого производства.

Таким образом, совершенствование химических и комбинированных технологий извлечения платиноидов обеспечивает экономическую эффективность, экологическую безопасность и устойчивое развитие металлургической отрасли

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.А. Инновационные методы переработки платиновых металлов. — М.: Металлургия, 2021. — 248 с.
2. Шеин А.Н., Токарев И.В. Комплексная переработка промышленных отходов, содержащих ПГМ. — СПб.: НИЦ металлургии, 2020. — 192 с.
3. Иванов И.И., Ким Р.С. Интенсификация процессов выщелачивания платиновых металлов с использованием микроволновой активации // Гидрометаллургия. — 2022. — Т. 195. — С. 45–52.
4. Яценко С.А., Миронов Л.П. Полимерные сорбенты для селективного извлечения металлов платиновой группы // Журнал прикладной химии. — 2023. — Т. 96, №2. — С. 178–186.
5. Борбат В.Ф., Шарипов Х.Т. и др. Химия и технология платиновых металлов. — Ташкент: Фан, 2018. — 312 с.

ISSN 3030-3907

6. Adams M.D., Wills B.A. Extractive Metallurgy of Platinum-Group Metals. — Oxford: Elsevier, 2019. — 385 p.
7. Nicol M.J., Anderson C.G. Leaching and recovery of platinum group metals from ores and concentrates // Hydrometallurgy. — 2018. — Vol. 175. — P. 98–110.

ISSN 3030-3907