СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ, СОДЕРЖАЩЕГО МЕТАЛЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

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

Annotatsiya: Ishda platina guruhi metallarini (PGM) tabiiy va texnogen xomashyodan olish bo‘yicha zamonaviy texnologiyalarning kompleks tahlili taqdim etilgan. Gidrometallurgik, pirometallurgik va biogidrometallurgik usullar, shuningdek sorbsiya va membranali tozalash texnologiyalari ko‘rib chiqilgan. Jarayonlarning samaradorligini oshirish uchun alternativ reagentlardan foydalanish, fiziko-kimyoviy faollashtirish, kombinirovan sxema va raqamli monitoringni qo‘llash imkoniyatlariga alohida e’tibor qaratilgan. Ishlab chiqarishning ekologik yo‘nalishini ta’minlash, suv aylanishining yopiq sikllarini joriy etish va reagentlarning qayta tiklanishini amalga oshirish zarurligi ta’kidlangan, bu esa ekologik yukni kamaytirish va sohaning barqarorligini oshirishga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: platina guruhi metallari, texnogen xomashyo, chiqarish (vыщelachivanie), sorbsiya, biogidrometallurgiya, kombinirovan jarayonlar, ekologik qayta ishlash, texnologiyalik intensivlashtirish.

Аннотация: В работе представлен комплексный анализ современных технологий извлечения металлов платиновой группы (МПГ) из природного и техногенного сырья. Рассмотрены гидрометаллургические, пирометаллургические и биогидрометаллургические методы, а также технологии сорбции и мембранной очистки. Особое внимание уделено перспективам повышения эффективности процессов за счёт применения альтернативных реагентов, физико-химической активации, комбинированных схем переработки и цифрового мониторинга. Подчёркнута необходимость экологической ориентации производства, внедрения замкнутых циклов водооборота и регенерации реагентов, что способствует снижению экологической нагрузки и повышению устойчивости отрасли.

Ключевые слова: металлы платиновой группы, техногенное сырьё, выщелачивание, сорбция, биогидрометаллургия, комбинированные процессы, экологическая переработка, технологическая интенсификация.

Abstract: This study presents a comprehensive analysis of modern technologies for the extraction of platinum-group metals (PGMs) from both natural and technogenic raw materials. The paper examines hydrometallurgical,

ISSN 3030-3907

pyrometallurgical, and biohydrometallurgical methods, as well as sorption and membrane-based separation technologies. Special attention is given to approaches aimed at enhancing process efficiency through the use of alternative reagents, physico-chemical activation, combined processing schemes, and digital monitoring. The importance of environmentally oriented production, implementation of closed-loop water cycles, and reagent regeneration is emphasized, contributing to reduced environmental impact and increased sustainability of the industry.

Keywords: platinum-group metals, technogenic raw materials, leaching, sorption, biohydrometallurgy, combined processes, environmentally friendly processing, technological intensification.

Введение

Металлы платиновой группы (МПГ) — платина, палладий, родий, рутений, иридий и осмий — являются одним из важнейших классов стратегически ценных материалов, играющих ключевую роль в современном высокотехнологичном производстве. Их ценность обусловлена уникальными каталитическими свойствами, высокой химической и термической стойкостью, а также способностью работать в экстремальных условиях [1,5]. Благодаря этим свойствам МПГ находят широкое применение в нефтехимии, автомобильной промышленности, электронике, медицине, ювелирном деле, оборонной отрасли и в сфере возобновляемой энергетики [6].

Исторически добыча платины и родственных металлов началась в XVIII веке, однако лишь в XX веке их промышленное производство достигло значительных масштабов. На сегодняшний день добыча МПГ сосредоточена преимущественно в нескольких странах. Южная Африка, Россия и Зимбабве обеспечивают более 80% мировой добычи платины и палладия [5]. Такая географическая концентрация добычи делает рынок МПГ чувствительным к геополитическим и экономическим колебаниям. Например, перебои с поставками в 2020–2022 гг., вызванные пандемией и санкционными ограничениями, привели к росту цен на палладий более чем в два раза.

Мировой спрос на МПГ растёт, в частности из-за ужесточения экологических норм на автомобильные выбросы и развития водородной энергетики, где платина используется в топливных элементах. По данным Johnson Matthey (2023), к 2030 году потребление платины в топливных элементах может вырасти в 5–6 раз.

Однако истощение высокосортных руд, усложнение минералогического состава и рост затрат на добычу обуславливают необходимость поиска новых источников МПГ. Всё больше внимания

ISSN 3030-3907

уделяется техногенным источникам — отработанным автокатализаторам, электронному лому, шламам металлургических производств и хвостам обогащения [2,6]. Параллельно растёт давление международных стандартов ESG, что требует внедрения экологичных и ресурсосберегающих технологий переработки [4].

Таким образом, разработка современных технологий переработки МПГ должна учитывать технологическую эффективность, экономическую целесообразность и минимизацию экологического воздействия.

Литературный обзор: Современные научные исследования в области переработки МПГ сосредоточены на создании высокоселективных, энергосберегающих и экологически безопасных технологий [1–7] и выделяют следующие перспективные направления:

-Использование реагентов нового поколения, включая тиосульфаты, органические комплексоны, тиомочевину и синтетические лиганды, что снижает токсичность и улучшает селективность процессов [1,3];

-Применение физико-химической активации (ультразвуковое воздействие, микроволновое излучение, электрохимическая стимуляция) для ускорения выщелачивания и повышения выхода целевых металлов [3,7];

-Развитие биогидрометаллургических методов с использованием окисляющих микроорганизмов для переработки бедных и упорных руд и техногенного сырья, сокращая расход химических реагентов и потребление энергии [6];

-Создание комбинированных схем переработки, объединяющих пирометаллургические и гидрометаллургические стадии, включая хлорирование, сульфидизацию и последующее выщелачивание [1,5,7];

-Разработка и внедрение селективных сорбентов и мембранных технологий для получения концентратов высокой чистоты и минимизации побочных отходов [4,6];

-Использование цифровых технологий, включая онлайн-контроль состава растворов и алгоритмы машинного обучения для прогнозирования производственных параметров и оптимизации процессов [3,5].

Альтернативные реагенты нового поколения. Отказ от традиционных высокотоксичных систем (цианиды, хлор) в пользу тиосульфатов, тиомочевины и органических комплексонов является одной из наиболее перспективных тенденций. По данным Кузнецова [1], использование тиосульфатов в присутствии катализаторов меди при переработке сульфидных концентратов позволяет достичь извлечения платины на уровне 93–95% при снижении расхода реагентов на 20–25%. Nicol и Anderson [7]

ISSN 3030-3907

отмечают, что тиосульфаты менее подвержены разложению, что упрощает их регенерацию и снижает эксплуатационные затраты.

Физико-химическая активация. Микроволновое нагревание и ультразвуковая обработка позволяют разрушать кристаллические решётки минералов и ускорять выщелачивание МПГ. Иванов и Ким [3] показали, что микроволновая активация концентратов перед выщелачиванием сокращает продолжительность процесса в 1,7 раза, а степень извлечения палладия достигает 96%. Ультразвук, в свою очередь, обеспечивает интенсивное диспергирование частиц, увеличивая площадь контакта реагента с минералом.

Биогидрометаллургические методы. Применение окисляющих микроорганизмов, таких как Acidithiobacillus ferrooxidans и Leptospirillum ferrooxidans, позволяет перерабатывать бедные руды и хвосты обогащения без значительных затрат на реагенты и энергию [6]. Adams и Wills [6] приводят данные, согласно которым биовыщелачивание хвостов с содержанием платины менее 1 г/т позволяет извлекать до 70% металла при минимальных расходах серной кислоты.

Комбинированные технологические схемы. Совмещение пирометаллургии (обжиг, плавка, сульфидизация) и гидрометаллургии (выщелачивание, сорбция) повышает извлечение МПГ, позволяет перерабатывать многокомпонентное сырьё и эффективно разделять металлы [1,5].

Сорбционные и мембранные методы. Яценко и Миронов [4] описывают полимерные сорбенты с тиольными группами, способные селективно извлекать платину и палладий даже из растворов с высоким содержанием железа и меди. Мембранные технологии позволяют концентрировать растворы МПГ и одновременно удалять примеси, что важно для получения продуктов высокой чистоты.

Цифровизация переработки. Интеграция сенсоров и систем машинного обучения в технологические линии позволяет в режиме реального времени отслеживать химический состав растворов и автоматически регулировать расход реагентов [3,5]. Это не только повышает стабильность процессов, но и снижает себестоимость переработки.

ISSN 3030-3907

Табл-1.

Сравнительная таблица методов извлечения платиноидов

Метод	Преимущества	Недостатки	Литература
Тиосульфатное и тиомочевинное выщелачивание	Низкая токсичность, высокая селективность, простота регенерации реагентов	Более низкая скорость по сравнению с хлорными системами	[1,3,7]
Микроволновая и ультразвуковая активация	Ускорение выщелачивания, повышение извлечения МПГ	Необходимость энергозатрат на оборудование	[3]
Биогидрометаллургия	Экологичность, снижение расхода реагентов	Медленное протекание процессов	[6]
Комбинированные схемы (пиро- и гидрометаллургия)	Высокая селективность, переработка сложного сырья	Многокомпонентность и сложность управления	[1,5]
Сорбционные и мембранные технологии	Высокая чистота продуктов, снижение водопотребления	Высокая стоимость сорбентов	[4]

Тенденция последних лет — интеграция нескольких методов в одну технологическую линию, что позволяет компенсировать недостатки каждого из подходов. Например, сочетание биовыщелачивания с последующей сорбцией обеспечивает высокое извлечение металлов при минимальных экологических затратах.

Методология исследования: В исследовании были изучены природные сульфидные руды, медно-никелевые концентраты и техногенное сырьё (автокатализаторы, шламы, пыль газоочистки).

Для изучения эффективности технологий использовались:

лабораторные автоклавы и реакторы с микроволновым нагревом (2,45 ГГц, мощность 1,2 кВт);

ISSN 3030-3907

ультразвуковые диспергаторы (22 кГц, мощность 600 Вт);
сорбционные колонки с полимерными сорбентами (по [4]);
аналитическое оборудование: ICP-MS, атомно-абсорбционная спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ.

Подготовка проб охватывала дробление до фракции <0,074 мм, просушку при 105 °C и гомогенизацию.

Методологическая основа включала:

- сравнительный анализ традиционных и альтернативных реагентных систем для выщелачивания;
- исследование влияния физических методов активации на скорость и полноту растворения металлов;
- разработку и тестирование комбинированных технологических схем, включая последовательное или параллельное применение пиро- и гидрометаллургических стадий;
- тестирование сорбционных и мембранных материалов на селективность, ёмкость и долговечность;
- экологическую оценку подходов с точки зрения снижения отходов, минимизации солевых нагрузок и замкнутого водооборота;
- использование цифровых методов мониторинга для контроля процесса и оптимизации расхода реагентов.

Эксперименты проводились в три этапа:

1. Оптимизация реагентных систем (pH, температура, концентрация, время).
2. Изучение влияния микроволн и ультразвука на кинетику выщелачивания.
3. Тестирование сорбентов с различными функциональными группами.

Результаты и их обсуждение: Применение альтернативных реагентов в сочетании с микроволновой или ультразвуковой активацией позволило сократить время выщелачивания в 1,5–2 раза при сохранении или увеличении степени извлечения МПГ [3,7].

Методы биогидрометаллургии подтвердили эффективность при переработке бедных руд, обеспечивая снижение расхода кислот, энергии и объёма отходов [6].

Комбинированные схемы переработки обеспечили более высокую селективность отделения МПГ от цветных металлов, позволили перерабатывать комплексное сырьё и сократили энергозатраты [1,5].

Сорбционные и мембранные технологии позволили получать концентраты с чистотой более 99%, при этом минимизируя водопотребление и образование побочных отходов [4,6].

ISSN 3030-3907

Внедрение перерабатывающих схем с замкнутыми циклами водооборота, регенерацией реагентов и утилизацией побочных продуктов способствует снижению экологических рисков и повышению устойчивости производства [2,5]. Дополнительно цифровой контроль процессов обеспечивает оптимизацию параметров и повышает предсказуемость технологических результатов.

Заключение и предложения: Развитие технологий переработки МПГ будет определяться тремя основными факторами: усложнением сырьевой базы, ростом спроса и экологическими требованиями. По прогнозам Johnson Matthey (2023), к 2040 году спрос на платину и палладий увеличится на 35–40% за счёт роста производства водородных топливных элементов и ужесточения стандартов по выбросам.

Предлагается:

- продолжить оптимизацию реагентных систем с учётом экологической безопасности и минимизации отходов;
- развивать технологии физико-химической активации для сокращения времени и энергозатрат;
- расширять применение биогидрометаллургических методов для бедных и упорных руд и техногенного сырья;
- интегрировать сорбционные и мембранные процессы в существующие технологические цепочки;
- разрабатывать перерабатывающие комплексы с замкнутым циклом водооборота, регенерацией реагентов и цифровым мониторингом процессов;
- систематически проводить оценку жизненного цикла и углеродного следа новых технологических решений.

Комплексный подход позволит не только увеличить извлечение МПГ, но и снизить экологические и энергетические затраты, обеспечив долгосрочную устойчивость 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.

ISSN 3030-3907

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.
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