СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕНИЯ И ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПЕРЕДОВЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Хакимов Камол Жураевич,
PhD, доцент, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Ражабов Шахбоз Холмаматович
Ассистент, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Соатов Бекзод Шокирович
Ассистент, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Абдисоатов Сардор Зулфикорович
Ассистент, Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий

Аннотация: В статье проведён детальный анализ современных методов восстановления рения, включая традиционные гидрометаллургические подходы и передовые плазменные технологии. Рассмотрены термодинамические и кинетические аспекты восстановительных процессов, определяющие эффективность получения высокочистого рения. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие влияние плазменного воздействия на морфологические и структурные характеристики полученного металлического рения. Особое внимание уделено анализу примесного состава, энергетическим параметрам процессов и перспективам промышленного внедрения плазменных технологий в металлургии редких металлов.

Ключевые слова: рений, молибденит, извлечение, гидрометаллургия, плазменное восстановление, экстракция, переработка отходов.

Annotatsiya: Bu maqolada ko'rishni tiklashning zamonaviy usullari, jumladan an'anaviy gidrometallurgik yondashuvlar va ilg'or plazma texnologiyalari batafsil tahlil qilingan. Qayta tiklash jarayonlarining termodinamik va kinetik jihatlari ko'rib chiqiladi, bu yuqori toza reniy ishlab chiqarish samaradorligini belgilaydi. Olingan metall reniyning morfologik va strukturaviy xususiyatlariga plazma ta'sirining ta'sirini tasdiqlovchi eksperimental ma'lumotlar keltirilgan. Nopoklik tarkibini tahlil qilish, jarayonlarning energiya parametrlari va noyob metallar metallurgiyasida plazma texnologiyalarini sanoat yo'li bilan joriy etish istiqbollariga alohida e'tibor qaratildi.

ISSN 3030-3907

Kalit so'zlar: reniy, molibdenit, ekstraktsiya, gidrometallurgiya, plazmani tiklash, ekstraktsiya, qayta ishlash.

Annotation: this article provides a detailed analysis of modern vision restoration methods, including traditional hydrometallurgical approaches and advanced plasma technologies. The thermodynamic and kinetic aspects of recovery processes are considered, which determines the efficiency of high pure rhenium production. Experimental data are presented confirming the effect of plasma exposure on the morphological and structural properties of the resulting metal rhenium. Particular attention was paid to the analysis of the composition of impurity, the energy parameters of processes and the prospects for the industrial introduction of plasma technologies in the metallurgy of rare metals.

Keywords: rhenium, molybdenum, extraction, hydrometallurgy, plasma reduction, extraction, waste recycling.

При восстановлении перренатов аммония или калия водородом получается порошок рения. При электро - литическом выделении получают порошок или чешуйки (губчатые осадки рения). Способом термической диссоциации получают рениевые покрытия.

Восстановление перрената калия и аммония водородом под давлением (в растворах и твёрдом состоянии). Установлено, что перренаты калия и аммония как в растворах. так и в твёрдом виде восстанавливаются водородом при сравнительно низких температурах (200 300°C) под давлением 20-100 атм. При восстановлении безводных перренатов калия или аммония водородом под давлением в 50 атм металлический рений получается всего за 1-2 ч.

При восстановлении водородом под давлением растворов перренатов калия или аммония в присутствии соляной кислоты можно получить ряд промежуточных соединений рения низшей валентности, например $(NH_4)_2 ReCl_6$ и $(NH_4)_2ReCl_4$, которые могут быть использованы для получения металлического рения высокой степени чистоты, не содержащего кислород. Восстановление протекает по следующим реакциям:

$2NH_4ReO_4 + 3H_2 + 12\ HCl = (NH_4)_2ReCl_6 + H_2ReCl_6 + 8H_2O$ (при 270°C);

$H_2ReCl_6 + 2NH_4Cl = (NH_4)_2ReCl_6 + 2HCl$; $(NH_4)_2ReCl_6 + H_2 = (NH_4)_2ReCl_4 + 2HCl$ (при 300 – 325°C в растворе HCl);

$(NH_4)_2ReCl_6 + 2H_2 = Re + 2NH_3 + 6HCl$ (при 400 – 500°C в твёрдом состоянии).

К «хлорным» способам относится также способ, заключающийся в

ISSN 3030-3907

хлорировании технического рения при температуре 600-700°С. Полученный пентахлорид рения, $ReCl_5$ очищают вакуумной дистилляцией. Хлорид разлагают водой. При этом 65-70% рения осаждается в виде гидратированной двуокиси. Полное разложение хлорида достигается при pH=2,5-3,0. Отфильтрованный и промытый осадок сушат в вакууме и восстанавливают водородом в две стадии: сначала при 400-600°С, а затем при 800°С. Раствор окисляют перекисью водорода, нейтрализуют аммиаком и выделяют из него перренат аммония, который возвращают на восстановление. Метод обеспечивает хорошую очисткуот примесей щелочных и щелочноземельных металлов. В тоже время железо, кремний и ряд других примесей не отделяются.

В табл.1 приведены данные по содержанию примесей в порошке рения, полученного восстановлением различными способами.

Таблица 1

Содержание примесей в рениевом порошке,полученном различными способами

Примеси	Содержание примесей в рении (%), полученном		
	из $KReO_4$	из NH_4ReO_4	хлоридным методом
Кремний	0,005	0,028	0,015
Железо	0,050	0,024	0,012
Алюминий	0,009	0,094	0,008
Марганец	0,007	0,002	0.007
Магний	0,002	0,038	0.005
Кальций	0,008	0,017	0,002
Медь	0,001	0,002	0,0002
Молибден	0,150	Нет	нет
Калий	0,410	Нет	нет
Натрий	0,150	Нет	нет
Никель	0,003	Нет	нет
Хром	0,004	Нет	нет
Примесей всего:	0,799	0,205	0,049

Восстановление перрената аммония водородом с применением плазмы. Поскольку в открытых источниках нетданных по водородному восстановлению рения из перрената аммония с применением плазмы, рассмотрим наиболее близкие процессы - восстановление металлов из оксидов. Большинство металлов, таких как железо, алюминий, кремний, марганец, хром, никель, титан, ванадий и т. д., извлекаются из оксидных

ISSN 3030-3907

минералов путем восстановления.

Немаловажную роль играют заряженные частицы в плазме. Процессы восстановления происходят на границе раздела плазма-подложка (таблетка) порошок, где восстановительный газ находится в плазменном состоянии. Плазма, которая проводит электричество, находится в контакте с обрабатываемым материалом, который находится в твердом или жидком состоянии. Очевидно, что тогда полярность заряда должна играть важную роль, чтобыпривлечь нужные частицы из объема плазмы к границе раздела, где происходят желаемые реакции. Например, для восстановления из оксида железа положительная полярность реагирующей поверхности снижает термодинамический потенциал реакции восстановления по сравнению со случаем с нейтральной реагирующей поверхностью. И наоборот, в случае поверхности с отрицательной полярностью реакция протекает намного быстрее, т.е. ΔG более отрицательный.

Чтобы протекала химическая реакция, реагирующие частицы с достаточной кинетической энергией должны сначала столкнуться, чтобы преодолеть активационныйбарьер. В контексте взаимодействия плазмы с оксидами металлов в литературе подчеркивается роль колебательно-возбужденных молекул водорода. Молекулы в состояниивибрационном колебании, могут иметь внутреннюю энергию до 4,5 эВ, полученную при вращении и вибрации. Они передают свою внутреннюю энергию другим молекулам и атомам в газовой фазе при неупругих столкновениях и химических реакциях. В результате внутренняя энергия реагирующих частиц увеличивается, и барьер активации уменьшается, облегчая протекание реакции.

Водородная плазма не только обеспечивает улучшенные условия восстановления, но также обеспечивает высокую температуру плазмы для интенсификации процессов восстановления, тем самым обеспечивая возможность проведения процессов в одной стадии, которые, в свою очередь, делают металлургическое оборудование меньшим по размеру чем традиционные оборудования.

Созданию экспериментальной установки, предназначенной для осуществления восстановительных процессов для получения рений высокой чистоты на водородной плазме, предшествовало изучение результатов собственных экспериментальных исследований, позволивших сформировать перечень основных технических требований к установке. Физические процессы в плазме сильно зависят от

ISSN 3030-3907

геометрических параметров реактора, таких как расстояние, между электродами и размер электродов, который имеет огромное влияние на напряженности поля между электродами. В общих чертах плазмохимический реактор представлял собой кварцевую трубу, помещенную в муфельную печь с открытыми торцами и электродную систему (рис.2).

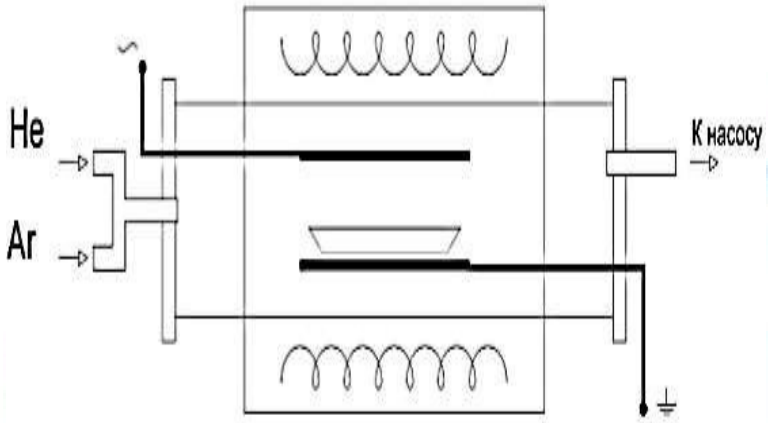


Рис. 2. Принципиальная схема плазмохимического реактора

Вакуумная система реактора оборудована механическим насосом и охлаждаемой ловушкой. Придельный вакуум, получаемый в камере 10^{-2} торр. Вакуум измеряется вакуумметрами в камере и вакуумной магистрали. Газовая система имеет два узла для подачи водорода и инертного газа.

Более детально образцы исследовались методом рамановской спектроскопии. Ниже на рис. 3-6 представлены раман спектры перрената аммония (для сравнения) и образцов, которые показывает исчезновение характерных пиков перрената аммония, что подтверждает полное восстановления металлического рения из перрената аммония. Некоторые “шумовые” пики на спектрах характеризуются пост процессным окислением поверх- ностей тонких порошков металлического рения. Отсутствие подобного шума на спектрах рентгеновской дифракции подтверждает этот факт.

ISSN 3030-3907

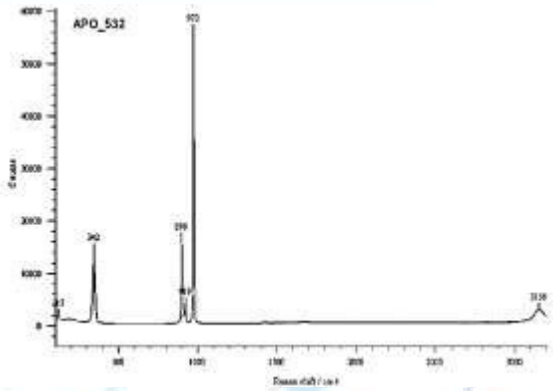


Рис.3. Раман спектр перрената аммония

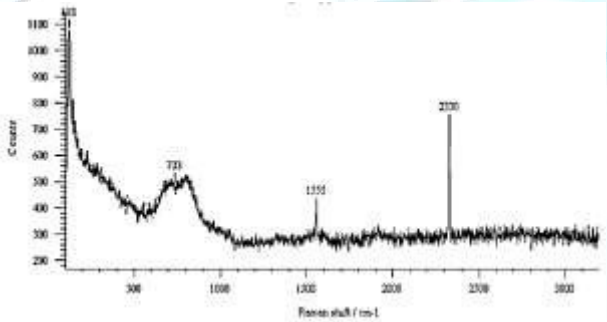


Рис. 4. Раман спектр пробы металлического рения

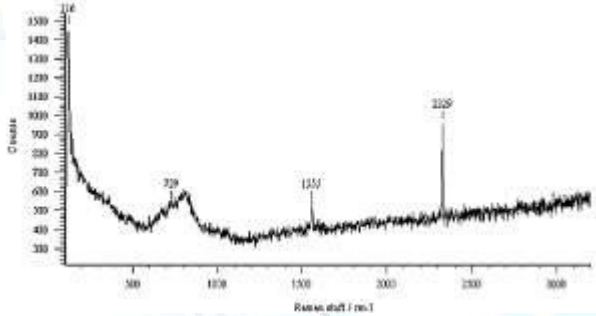


Рис. 5. Раман спектр пробы металлического рения

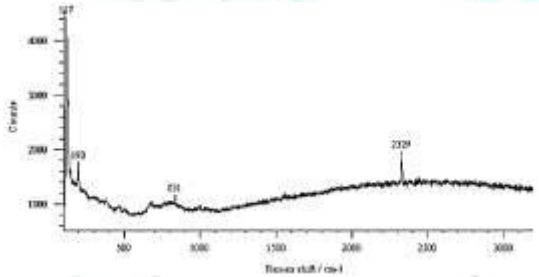


Рис. 6. Раман спектр пробы металлического рения

Таким образом, полученные результаты показывают, плазма способствует более эффективному протеканию процесса восстановления рения из перрената аммония. Причем это приводит к заметному увеличению производительности процесса, снижению энергопотребления и расхода водорода. Детальный анализ процессов

ISSN 3030-3907

восстановления рения термическим способом и с применением плазмы показывает, что применение плазмы позволяет снизить расходы на единицу продуктаэлектроэнергии - в два раза, водорода - до трех раз. Общую производительность установок можно увеличить на 60- 100% также за счет увеличения толщины слоя загрузки перрената аммония. При этом заметных изменений гранулометрического состава металлического рения не обнаруживаются, видимо гранулометрический состав определяется в большей степени характеристиками исходного порошка перрената аммония.

Что касается образцов рис. 4-6, восстановленных сверхчистым водородом в присутствии плазмы, здесь заметны такие примеси, как Rb - 168,2 ppm, Sb - 54,8 ppm, P -23,3 ppm, Te - 9,5 ppm, Au - 18,1 ppm, Pt - 13,7 ppm, S - 6,4 ppm. Содержание рения в данных образцах определяется от 99,94% до 99,96, что также ближе марки Ре-1. Однако, в образцах обнаруживается относительно высокое содержание серы от 0,0003 до 0,005%. Это обстоятельство требует разработки дополнительных мер по удалению серы из состава продукта.

Выводы: Анализ представленных методов восстановления рения показывает, что использование плазменных технологий позволяет достичь более высокой степени извлечения металла (95-98%) при снижении энергозатрат и минимизации потерь. В сравнении с традиционными методами, плазменное восстановление способствует улучшению физико-химических характеристик рения, включая его чистоту и гранулометрический состав. Дальнейшее развитие данной технологии требует углублённого изучения механизмов взаимодействия рения с плазмой, совершенствования процессов удаления примесей и оптимизации условий для масштабного промышленного применения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокушева А.А., Дайрабаева Г.А., Усабекова А.Ш., Перфельев Н. А. Извлечение рения из сернокислотных шламов Джезказганского медеплавильного завода // Цветные металлы. – 1992. - № 5. – С.14 – 15.
2. Палант А.А., Трошкина И.Д., Чекмарёв А.М. Металлургия рения. – М.: Наука, 2007. 298 с.
3. Савицкий Е.М., Тылкина М.А., Поварова К.Б. Сплавы рения. – М.: Наука, 1965.

ISSN 3030-3907

4. Санакулов К.С., Мухиддинов Б.Ф., Хасанов А.С. Химические Элементы свойства, получение, применение. Тошкент «Турон замин зиё» 2016 г. 493с.

5. Хакимов К.Ж., Ражабов Ш.Х. Методы извлечения, обработки и обогащения рения // Цифровые технологии в промышленности - Қарши, 2024 - №1 С. 54-59.

6. Хасанов, А. С., Ахмедов Ў. Ч**.,** Хакимов К.Ж. Обжиг сульфидных ренийсодержащих концентратов // Композиционные материалы – Ташкент, 2025 №1, С 192-195

7. Хасанов, А. С., Ахмедов Ў. Ч**.,** Хакимов К.Ж. Технологии получения, переработки и применения рения в высокотехнологичных отраслях промышленности // Цифровые технологии в промышленности - Қарши, 2025 - №3(1) С. 63-69.

8. Хасанов, А. С., Хакимов, К. Ж., Шодиев, А. Н., & Эшонкулов, У. Х. (2018). Уран и Золото. Мухофаза+ Ижтимиойсийосий, илмий-амалий ва бадиий журнал, (01 (157)), 13.

9. Хасанов, А. С., Хакимов, К. Ж., Шодиев, А. Н., & Эшонкулов, У. Х. (2018). Уран и Золото. *Мухофаза+ Ижтимиойсийосий, илмий-амалий ва бадиий журнал*, (01 (157)), 13.

10. Хакимов, К. Ж., Эшонқулов, У. Х., & Умирзоқов, А. (2020). Complex Processing Of Lead-Containing Technogenic Waste From Mining And Metallurgical Industries In The Urals. *The american journal of engineering and technology (TAJET) SJIF-5.32 DOI-10.37547/tajet*, *2*(9), 2689-0984.

ISSN 3030-3907