

*На правах рукописи*

**Игнатович Александр Сергеевич**



**ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕДИ И РЕНИЯ ИЗ РАСТВОРОВ  
АММИАЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕДНЫХ  
НЕКОНДИЦИОННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ**

*Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и  
редких металлов*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург – 2021**

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Луцкий Денис Сергеевич*

**Официальные оппоненты:**

*Суходолов Николай Геннадиевич,*  
доктор химических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра коллоидной химии, доцент;

*Серебряков Максим Александрович,*  
кандидат технических наук, публичное акционерное общество «Северсталь», Дирекция по техническому развитию и качеству, ведущий эксперт.

**Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.**

Защита диссертации состоится 27 декабря 2021 г. в 12.30 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб-сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 27 октября 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета

Бодуэн  
Анна Ярославовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В последние годы наблюдается значительное истощение сырьевых запасов богатых руд, в связи с чем в производство все чаще вовлекаются окисленные, бедные и труднообогатимые руды, отходы металлургических производств. Запасы подобного рода обширны и содержат десятки миллионов тонн ценных металлов. Таким образом, общей задачей, не теряющей актуальность, становится поиск и реализация новых способов получения металлов из нетрадиционных источников сырья. Кроме того, забалансовые руды, некондиционные концентраты и шлаки металлургической промышленности создают долговременное загрязнение окружающей среды. В частности, на данный момент в России количество произведенных техногенных медьсодержащих отходов сопоставимо с объемами балансовых месторождений. Каждый год в ходе функционирования предприятий металлургического профиля производится около 100 миллионов тонн шлаков, содержащих рений и пригодных к дальнейшей переработке.

Исследования по теории и технологии рационального использования нетрадиционного сырья, развитию и совершенствованию существующей технологической базы отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых: В.М. Сизякова, И.Н. Белоглазова, Д.Э. Чиркста, А.И. Окунева, Я.М. Шнеерсона, П. Гленсдорфа и др.

### **Степень разработанности темы исследования**

Большинство известных технических решений по получению рения заключаются в извлечении перренат-ионов из кислой среды. Кислотные способы переработки применимы не для всех видов сырья, особенно бедного, требуют использования коррозионно стойкого оборудования. С другой стороны, известен способ автоклавного аммиачного выщелачивания некондиционных медных концентратов, в ходе которого около 90 % меди, рения и серебра переводятся в раствор, что может быть положено в основу разработки комплексной технологии при условии наличия способа переработки аммиачных растворов с извлечением из них ценных компонентов.

Таким образом, разработка технических решений, направленных на переработку аммиачных растворов выщелачивания некондиционного медного концентрата с извлечением меди, рения и серебра является актуальной задачей.

**Цель работы** – разработка научно обоснованных технических решений комплексной переработки аммиачных растворов выщелачивания некондиционного медного концентрата.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Проведение теоретических исследований, направленных на выбор метода извлечения рения из аммиачных сред.

2. Критический анализ и выбор методов извлечения и разделения меди и серебра из аммиачных сред.

3. Установление закономерностей сорбционного извлечения и концентрирования рения из аммиачных сред и условий селективного извлечения рения.

4. Определение условий селективного извлечения меди методом жидкостной экстракции и выделения серебра.

**Научная новизна работы:**

1. Детально изучены термодинамические параметры сорбции перренат-иона на слабоосновных анионитах марки Purolite: PPA100 и A103 Plus. Значения константы равновесия для сорбента PPA100, равное  $16,67 \pm 0,04$ , превышает этот показатель для сорбента A103Plus, равный  $5,94 \pm 0,03$ .

2. Лимитирующей стадией сорбции перренат-иона на анионитах марки Purolite является внутренняя диффузия, на что указывает протекание процесса сорбции по формально первому порядку и коэффициент диффузии, значение которого лежит в пределах от  $2,27 \cdot 10^{-8}$  до  $2,92 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>/с.

3. Определены кинетические параметры процесса: константы скорости ионообменной адсорбции  $0,0072 \pm 0,0002$  мин<sup>-1</sup> (PPA100) и  $0,0056 \pm 0,0001$  мин<sup>-1</sup> (A103 Plus) и время полуобмена  $96,25 \pm 1,34$  мин (PPA100) и  $123,75 \pm 1,72$  мин (A103 Plus).

4. Экспериментально установлены закономерности экстракции аммиака меди с применением раствора хелатирующего экстрагента

LIX 84-I. Показано, что лимитирующей стадией экстракции аммиачных комплексов меди является диффузия, на что указывает протекание реакции по первому порядку и значение энергии активации равное  $40,85 \pm 0,08$  кДж/моль.

5. Сформированы основные этапы комплексной переработки аммиачных растворов выщелачивания некондиционных медных концентратов с получением соединений рения, меди и серебра, оборотом раствора сульфата аммония и получением попутной продукции широкого спектра назначения: сульфата аммония, востребованного в металлургии и отраслях химической технологии и сельском хозяйстве.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Показана возможность расширения сырьевой базы цветных и редких металлов за счет вовлечения в переработку некондиционного медного сульфидного сырья с получением меди и серебра.

2. Установлено, что достаточной эффективностью для извлечения рения из аммиачных сред обладают слабоосновные аниониты марки Purolite, применение которых обеспечивает степень извлечения рения не менее 95% и высокую степень его десорбции на этапе регенерации сорбента.

3. В соответствии с представлениями о форме существования меди, рения и серебра в аммиачных средах, выбраны направления их извлечения и разделения. Согласно физико-химическим показателям, константе равновесия, показателям скорости процесса, для сорбции перренат-иона рекомендован сорбент Purolite PPA100.

4. Извлечение меди из содержащих серебро аммиачных сред целесообразно проводить методом жидкостного экстракционного концентрирования с применением LIX84-I после предварительного отделения серебра цементацией на меди.

#### **Методология и методы исследований**

Для реализации поставленной цели и решения задач были использованы экспериментальные и теоретические методы исследований, химические, физические и физико-химические методы изучения состава и свойств. Исследования проводились на базе

лабораторий Санкт-Петербургского горного университета. Состав сырья, реагентов и продуктов установлен инструментальными методами анализа, включая спектральный анализ в видимой и инфракрасной областях света, рентгено-флуоресцентный анализ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Извлечение рения и меди из аммиачных растворов осуществляется методами сорбции перренат-иона на анионите Purolite PPA100 и экстракции аммиака меди экстрагентом LIX84- I.

2. Разработано научно обоснованное техническое решение переработки растворов аммиачного выщелачивания с извлечением меди и попутным выделением рения и серебра, что позволяет вовлечь в переработку некондиционные медные концентраты.

**Степень достоверности результатов исследования.**

Теоретические предположения, положенные в основу экспериментальных исследований, подтверждаются полученными опытными данными. Достоверность результатов, полученных при проведении лабораторных экспериментов, доказана их воспроизводимостью, повторяющейся тенденцией экспериментальных зависимостей, непротиворечивостью сведениям, описанным в литературе. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, являются оригинальными в силу крайне небольшого объёма информации о поведении перренат-ионов при сорбции из аммиачных сред.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертации представлялись и обсуждались на следующих конкурсах и конференциях: 58 Konferencija Studenckich Kol Naukowych Pionu Gorniczego 7 grudnia (г. Краков, Польша, 2017 г.), 12 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler (г. Фрайберг, Германия, 2018 г.); 62 International scientific conference 2019, University of mining and geology «St. Ivan Rilski» (г. София, Болгария, 2019 г.), XXVIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (г. Москва, 2021 г.).

Исследование было проведено при частичной финансовой поддержке РФФ, грант № 21-47-00019.

**Личный вклад автора** состоит в анализе отечественных и зарубежных литературных источников, в выборе и обосновании направлений исследования, организации, проведении и обобщении результатов экспериментов по изучению процессов извлечения меди и рения, разработке технологической схемы переработки медных некондиционных концентратов. Сформулированы цель, идея, задачи, основные защищаемые положения и выводы. Все разработки выполнены под непосредственным руководством и при участии соискателя.

**Публикации по работе.** Результаты диссертационной работы освещены в 7 печатных трудах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Подана 1 заявка на изобретение.

#### **Структура работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка используемой литературы из 89 наименований, списка иллюстративного материала. Общий объем работы – 118 страниц, в том числе 29 таблиц, 32 рисунка.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена актуальность диссертации, сформулированы цель и задачи, идея, научная новизна работы, а также отражена теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследований.

**В первой главе** выполнен анализ рынка меди и рения; выполнен анализ перспектив применения меди и рения в промышленности; дана сравнительная характеристика традиционных источников меди и рения; рассмотрены известные способы переработки сырья, содержащего медь и рений.

**Во второй главе** описаны объекты исследований, методы проведения аналитических работ, методики подготовки к исследованиям и проведения исследовательских испытаний.

**В третьей главе** приводится анализ физико-химических показателей сорбции перренат-ионов на анионитах; выполнена термодинамическая оценка процессов сорбции перрената-аммония из аммиачных растворов выщелачивания; получены кинетические показатели сорбции перренат-иона в аммиачных средах.

**В четвертой главе** приводится анализ физико-химических показателей экстракции аммиаков меди из аммиачных сред; выполнена термодинамическая оценка процессов экстракции меди из аммиачных растворов выщелачивания; получены кинетические показатели экстракции аммиаков меди.

**В пятой главе** диссертации представлено описание технических решений по переработке растворов аммиачного выщелачивания некондиционных медных концентратов; приводится последовательность технологических операций извлечения меди, серебра и рения, а также оценка экономической окупаемости данного технологического решения.

**В заключении** обобщены и изложены научные и практические результаты проведенных исследований в соответствии с поставленными задачами.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. Извлечение рения и меди из аммиачных растворов осуществляется методами сорбции перренат-иона на анионите Purolite PPA100 и экстракции аммиаката меди экстрагентом LIX 84-I.**

Экспериментально были получены изотермы сорбции перренат-иона для анионитов АВ-17-8, Purolite A103Plus и Purolite PPA100 (рисунок 1), которые описываются уравнениями, представленными в таблице 1.



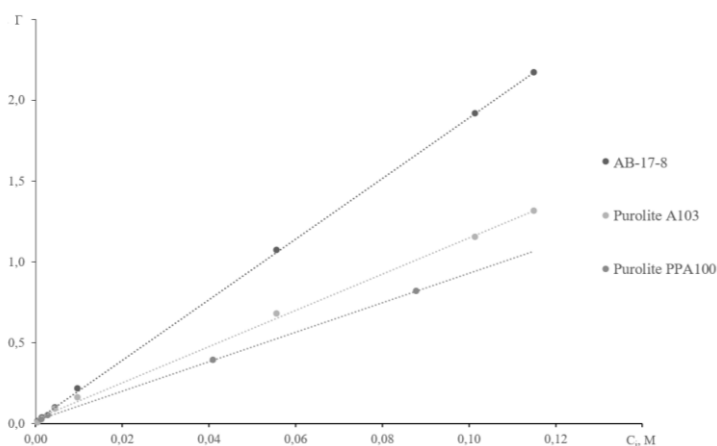


Рисунок 1 – Изотермы адсорбции рения на анионитах.

Таблица 1 – Линейные формы изотерм Лэнгмюра и Фрейндлиха

Ионит	Изотерма Лэнгмюра	Изотерма Фрейндлиха
АВ 17-8	$\frac{1}{\Gamma} = 0,0775 + 0,0449 \cdot \frac{1}{C_{aq}}$	$\lg \Gamma = 1,249 + 0,966 \cdot \lg C_{aq}$
Purolite A103	$\frac{1}{\Gamma} = 0,3141 + 0,0528 \cdot \frac{1}{C_{aq}}$	$\lg \Gamma = 1,0277 + 0,9343 \cdot \lg C_{aq}$
Purolite PPA100	$\frac{1}{\Gamma} = 0,8979 + 0,0539 \cdot \frac{1}{C_{aq}}$	$\lg \Gamma = 0,844 + 0,874 \cdot \lg C_{aq}$

Из линейных форм изотерм, представленных в таблице 1 для уравнений изотерм Лэнгмюра получены значения емкости адсорбционного мономолекулярного слоя ( $\Gamma_{\infty}$ ) и константы адсорбционного равновесия ( $K$ ), а для уравнений изотерм Фрейндлиха коэффициенты  $\frac{1}{n}$  и  $b$ , представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики сорбции рения на анионитах АВ-17-8, Purolite A103Plus и Purolite PPA100

Ионит	Изотерма Лэнгмюра		Изотерма Фрейндлиха	
	$\Gamma_{\infty}$ , моль/кг	$K$	$1/n$	$b$
АВ-17-8	12,903	1,73	0,966	17,754
Purolite A103Plus	3,185	5,94	0,934	10,659
Purolite PPA100	1,114	16,67	0,874	6,974

Уравнения линейной аппроксимации зависимостей сорбции перенат-иона (рисунок 2) от времени для анионитов АВ-17-8, Purolite A103Plus и Purolite PPA100, представленными в таблице 3.

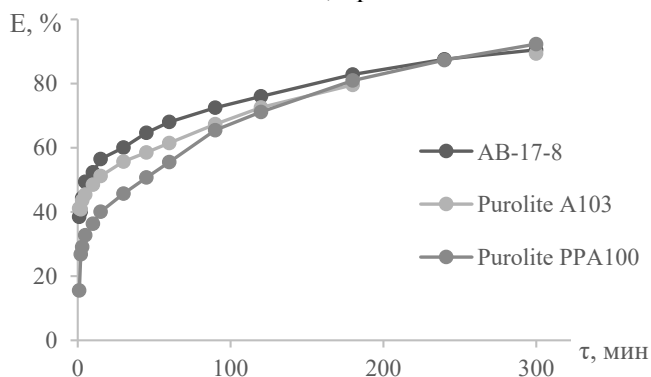


Рисунок 2 – Зависимость степени извлечения рения от продолжительности сорбции.

Таблица 3 – Линейные формы кинетических зависимостей

Ионит	Уравнение аппроксимации
АВ-17-8	$\ln C = -5,2293 - 0,0057 \cdot \tau$
Purolite A103Plus	$\ln C = -5,075 - 0,0056 \cdot \tau$
Purolite PPA100	$\ln C = -5,1644 - 0,0072 \cdot \tau$

Линейная аппроксимация полулогарифмических зависимостей указывает на формально первый порядок протекания процесса и косвенно свидетельствует о протекании процесса в диффузионной области. В таблице 4 показаны значения константы скорости ионообменной адсорбции ( $k$ ), время полуобмена и величина коэффициента диффузии для анионитов АВ-17-8, Purolite A103Plus и Purolite PPA100.

Таблица 4 – Кинетические характеристики сорбции рения

Ионит	$k$ , мин. <sup>-1</sup>	$\tau_{1/2}$ , мин.	$\bar{D}$ , см <sup>2</sup> /с
АВ-17-8	0,0057	121,58	$2,50 \cdot 10^{-8}$
Purolite A103Plus	0,0056	123,75	$2,27 \cdot 10^{-8}$
Purolite PPA100	0,0072	96,25	$2,92 \cdot 10^{-8}$

По величинам коэффициентов диффузии можно сделать вывод о внутренней диффузии в качестве лимитирующей стадии.

Исследованы условия применения в качестве экстрагента раствора LIX 84-I в керосине. Данный экстрагент принят для переработки медных сульфидных концентратов и руд для экстракции меди из кислых сред. Важно было понимание поведения LIX 84-I в щелочной аммиачной среде.

В таблице 5 представлена зависимость степени извлечения от соотношения органической и водной фазы, представленной раствором аммиачного выщелачивания некондиционных медных концентратов Джекказганской обогатительной фабрики.

Таблица 5 – Влияние соотношения объемов водной  $V_{aq}$  и органической  $V_{org}$  фаз на степень извлечения меди  $E$  при экстракции неразбавленным экстрагентом LIX 84-I.

$V_{org}:V_{aq}$	$C_{aq}$ , моль/дм <sup>3</sup>	$C_{org}$ , моль/дм <sup>3</sup>	$E$ , %
2:1	0,000	0,223	100,00
1:1	0,000	0,446	100,00
1:2	0,145	0,602	67,54
1:4	0,280	0,661	37,11
1:8	0,339	0,849	23,81

В таблице 6 приведены экспериментальные данные по влиянию степени разбавления экстрагента LIX 84-I керосином на степень извлечения меди из растворов выщелачивания.

Таблица 6 – Зависимость степени извлечения меди в экстракт от массовой доли LIX 84-I в составе экстрагента

$\omega$ , %	$C_{aq}$ , моль/дм <sup>3</sup>	$C_{org}$ , моль/дм <sup>3</sup>	$E$ , %
100	0,000	0,446	100,00
70	0,015	0,430	96,59
40	0,207	0,239	53,61
10	0,374	0,071	16,02

Влияние температуры на экстракцию меди показано на рисунке 3.

Из уравнений линейной аппроксимации кинетических зависимостей (таблица 7), получены значения констант скорости реакций при разных температурах и полуэкстракции (таблица 8).

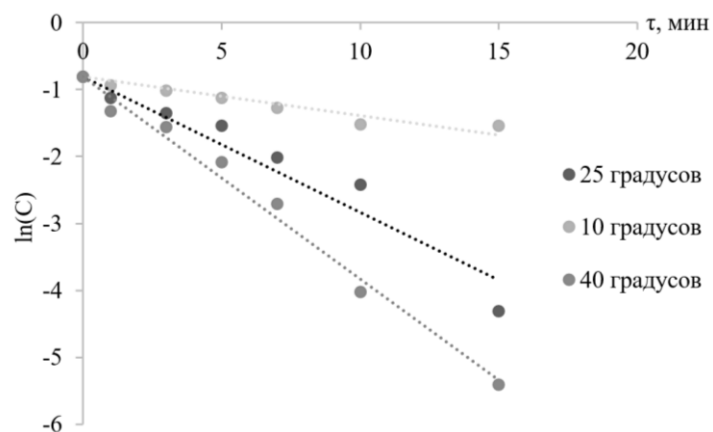


Рисунок 3 – Зависимость логарифма концентрации ионов аммиаката меди от времени экстракции при использовании 70 % раствора LIX 84-I в керосине.

Таблица 7 – Уравнения аппроксимации изотерм экстракции ионов аммиаката меди при использовании в качестве экстрагента 70 % раствора LIX 84-I в керосине

Температура, °С	Уравнения аппроксимации
10	$\ln C = -0,8074 - 0,058 \cdot \tau$
25	$\ln C = -0,8074 - 0,2023 \cdot \tau$
40	$\ln C = -0,8074 - 0,3024 \cdot \tau$

Таблица 8 – Влияние температуры на константу скорости экстракции и время полужизни аммиаката меди при использовании 70 % раствора LIX 84-I в керосине

T, °C	k, мин. <sup>-1</sup>	τ <sub>1/2</sub> , мин.
10	0,058	11,95
25	0,2023	3,43
40	0,3024	2,29

Линейную зависимость логарифма константы скорости реакции (рисунок 4) от обратной температуры описывает эмпирическое уравнение  $\ln k = -4913,5/T + 14,636$ .

По угловому коэффициенту уравнения аппроксимации установлено значение энергии активации равное 41 кДж/моль, что указывает на протекание экстракции по диффузионному механизму.

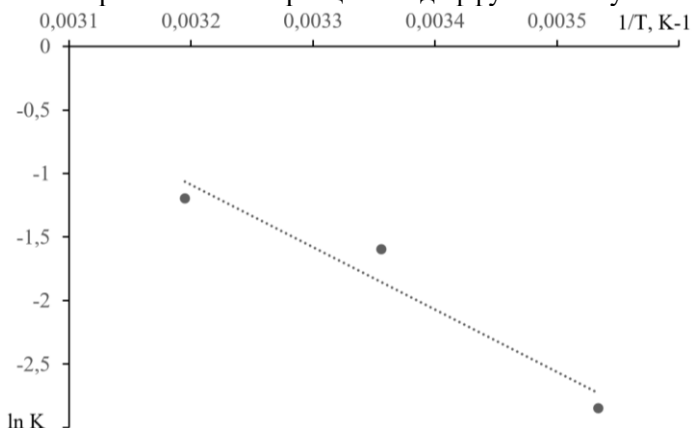


Рисунок 4 – Линейная форма зависимости константы скорости реакции от температуры

Экстракцию меди с применением LIX 84-I рекомендовано вести при температуре от 20 до 40 °С и массовой долей LIX в керосине 70 %.

Для реэкстракции меди рекомендован водный раствор, содержащий от 150 до 200 г/дм<sup>3</sup> серной кислоты. Полное извлечение меди и регенерация экстрагента осуществляется при времени контакта фаз не менее 10 минут.

**2. Разработано научно обоснованное техническое решение переработки растворов аммиачного выщелачивания с извлечением меди и попутным выделением рения и серебра, что позволяет вовлечь в переработку некондиционные медные концентраты.**

Было сформировано техническое решение по комплексному извлечению меди и рения из растворов автоклавного аммиачного выщелачивания некондиционных медных концентратов, представленное на рисунке 5.

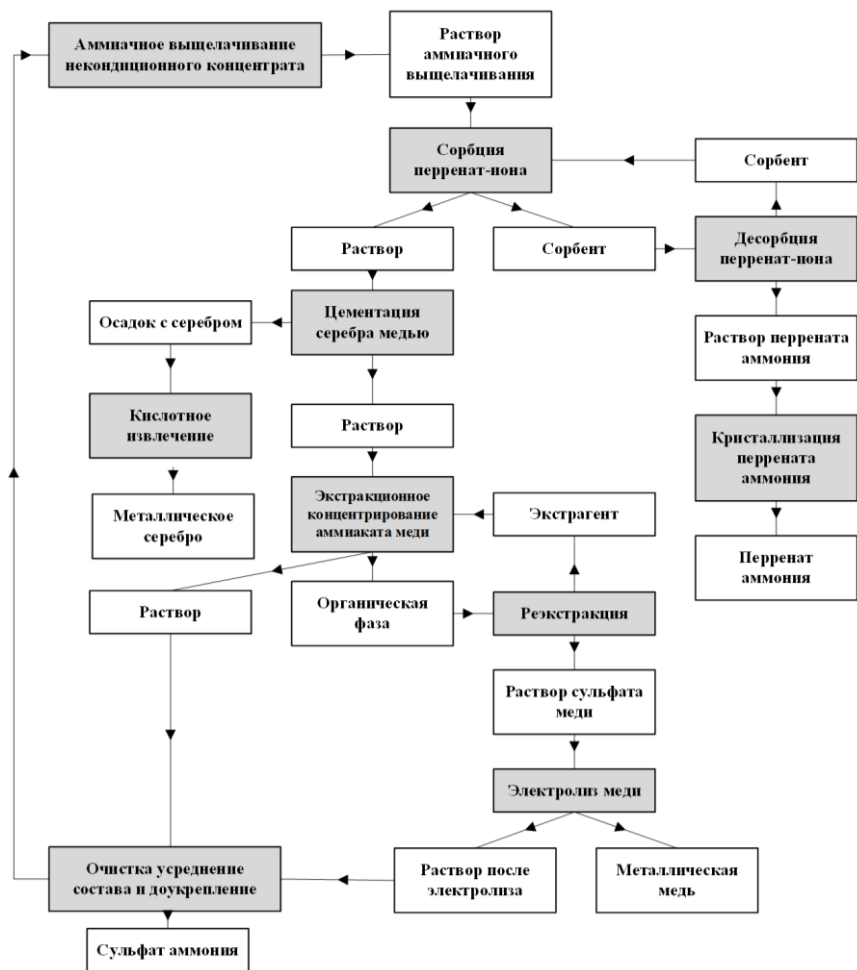


Рисунок 5 – Принципиальная технологическая схема переработки раствора аммиачного выщелачивания некондиционного концентрата

Раствор после аммиачного выщелачивания поступает на передел сорбционного извлечения перренат-иона на анионите Purolite PPA100 Plus после насыщения сорбента сорбционная колонна переводится в режим десорбции, а раствор выщелачивания переводят в параллельную колонну. Десорбция осуществляется водным раствором аммиака.

Раствор, прошедший сорбционную колонну, подвергается цементации серебра на металлической меди. Высаженное серебро извлекается с помощью азотнокислой обработки.

Раствор после цементации подвергается экстракционному концентрированию экстрагентом LIX 84-I. Аммиакат меди переходит в органическую фазу, откуда в дальнейшем извлекается многократно оборачиваемым серноокислым раствором, в котором концентрация серной кислоты поддерживается на уровне  $200 \text{ г/дм}^3$ , до момента пока концентрация меди в растворе извлечения не достигнет  $200 \text{ г/дм}^3$ .

После насыщения медью, раствор ректификации отправляется на электролиз меди с нерастворимым свинцовым анодом, в ходе которого получается металлическая медь.

Раствор после электролиза смешивается с водной фазой после экстракционного концентрирования, упаривается с получением товарного сульфата аммония, после чего доукрепляется раствором аммиака и возвращается на стадию автоклавного аммиачного выщелачивания.

Схема материальных потоков описанной технологии комплексного извлечения меди, рения и серебра из растворов аммиачного выщелачивания некондиционного концентрата была приведена на рисунке 6.

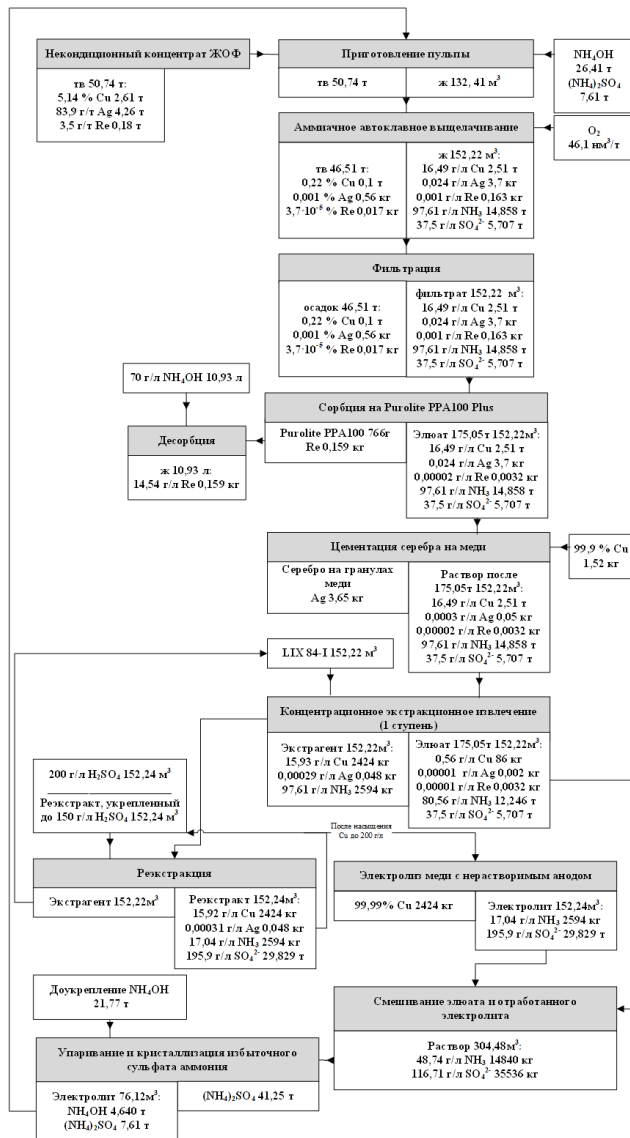


Рисунок 6 – Схема материальных потоков технологии комплексной переработки некондиционного медного концентрата



На основании схемы потоков был проведен расчет окупаемости технологии, приведенный в таблице 9. Согласно данным расчета, окупаемость технологии составляет 5 лет.

Таблица 9 – Основные ориентировочные показатели эффективности переработки некондиционного медного концентрата Джекказганской обогатительной фабрики по разработанной технологии

Параметр	Ед. измерения	Итого
Объем переработки черного концентрата для выхода на окупаемость предложенной технологии	т	95695
Металла в концентрате	-	-
Медь	т	4918,72
Рений	кг	334,93
Серебро	кг	8028,81
Сквозное извлечение в готовую продукцию:	-	-
Медь	%	98
Рений	%	94
Серебро	%	96
Всего произведено:	-	-
Медь катодная	т	4572
Перренат аммония кристаллический	кг	434
Серебро в гранулах	кг	6886
Сульфат аммония	т	9846
Доход после реализации:	-	-
Медь катодная	тыс. руб	3429712,93
Перренат аммония кристаллический	тыс. руб	455597,18
Серебро в гранулах	тыс. руб	449714,03
Сульфат аммония	тыс. руб	241222,20
<b>Итого</b>	<b>тыс. руб</b>	<b>4576246,36</b>
Производственные затраты	тыс. руб	1964609,89
Коммерческие затраты	тыс. руб	59064,88
Административные затраты	тыс. руб	451224,58
<b>Итого</b>	<b>тыс. руб</b>	<b>4151899,35</b>
Капитальные затраты	тыс. руб	2100000,00
<b>Итого</b>	<b>тыс. руб</b>	<b>2100000,00</b>
<b>Срок окупаемости с момента запуска</b>	<b>лет</b>	<b>5</b>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – извлечения меди и рения из растворов аммиачного медных некондиционных концентратов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Определены принципиальные направления технических решений, применяемых в переработке некондиционных медных концентратов, с целью расширения сырьевой базы за счет включения в переработку низкокачественного природного и техногенного сырья и извлечения меди и рения.

2. Проанализированы особенности сорбции рения из щелочных аммиачных сред на сильноосновных и слабоосновных анионитах. Установлено, что большей селективностью по отношению к рению обладают слабоосновные аниониты Purolite PPA100 и Purolite A103 Plus.

3. Описаны термодинамические характеристики сорбции рения на слабоосновных анионитах Purolite PPA100 и Purolite A103 Plus: определены значения предельной ёмкости 1,114 моль/кг (Purolite PPA100) и 3,185 моль/кг (Purolite A103 Plus), константы равновесия  $16,67 \pm 0,04$  (Purolite PPA100) и  $5,94 \pm 0,03$  (Purolite A103 Plus). Показано, что Purolite A103 Plus имеет большую предельную ёмкость.

4. Определены кинетические параметры ионообменной адсорбции перренат ионов на слабоосновных анионитах Purolite PPA100 и Purolite A103 Plus: константы скорости ионообменной адсорбции  $0,0072 \pm 0,0002 \text{ мин}^{-1}$  (Purolite PPA100) и  $0,0056 \pm 0,0001 \text{ мин}^{-1}$  (Purolite A103 Plus), время полуобмена  $96,25 \pm 1,34 \text{ мин}$  (Purolite PPA100) и  $123,75 \pm 1,72 \text{ мин}$  (Purolite A103 Plus). Для сорбционного отделения рения по совокупности физико-химических показателей процесса является предпочтительным использование анионита Purolite PPA100.

5. Для извлечения меди рекомендован метод жидкостной экстракции с применением оксимов (экстрагенты марки LIX), устойчивых в сильнощелочной среде и обладающих селективностью по отношению к медно-аммиачным комплексам.

6. Для извлечения меди из щелочных аммиачных сред рекомендован LIX 84-I. Ёмкость экстрагента LIX 84-I по меди составила  $28 \text{ г/дм}^3$ . Метод жидкостной экстракции позволяет совмещать операции

извлечения и концентрирования меди из растворов аммиачного выщелачивания, что особо актуально при переработке растворов с невысокой концентрацией целевого компонента, образующихся при переработке некондиционного сырья.

7. Экспериментально установлены условия проведения процесса: соотношение объемов водной и органической фаз 1 : 1; концентрация экстрагента в органической фазе, которая составила 70 %. Время контакта фаз определяется лимитирующей стадией процесса – внешней диффузией ( $E_a = 40,85 \pm 0,08$  кДж/моль) и составляет 20 минут.

8. Предложено техническое решение по переработке растворов аммиачного выщелачивания некондиционных медных концентратов, включающее в себя этап сорбционного извлечения перренат-ионов на анионите Purolite PPA100, цементации серебра на меди, экстракционного концентрирования меди при помощи экстрагента LIX84-I и получение ликвидных товарных продуктов: соединений рения, меди и серебра, и получением попутной продукции широкого спектра назначения: сульфата аммония, востребованного в металлургии и отраслях химической технологии и сельском хозяйстве.

9. Произведена оценка срока окупаемости предложенных технических решений, направленных на переработку растворов аммиачного выщелачивания некондиционных медных концентратов, по данным которой срок окупаемости составил 5 лет при ежегодной переработке 95695 т некондиционного концентрата.

10. Результаты диссертации в дальнейшем могут быть использованы в качестве основы для разработки и проектирования комплексных решений по извлечению меди и рения из растворов аммиачного выщелачивания некондиционного сырья.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1 Игнатович, А.С. Определение кинетических параметров извлечения рения анионитами из аммиачных растворов выщелачивания некондиционного сырья / **А.С. Игнатович**, Р.Р. Хисматуллин, М.А. Зубакина // Естественные и технические науки. – 2021 – №8 (159) – С.174-178 – (Chemical Abstracts)

2 Луцкий, Д.С. Исследование экстракции меди из растворов аммиачного выщелачивания шлаков медеплавильного производства / Д.С. Луцкий, **А.С. Игнатович**, Р.Р. Хисматуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия» – 2021 – № 3(Т.21) – С. 82–87

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3 Lutskiy, D.S. Determination of the sorption characteristics of ammonium perrenate ions on anion exchange resin AV-17-8 / **A.S. Ignatovich**, D.S. Lutskiy, M.A. Sulimova // Journal of Physics: Conference Series, 1399 (5), 2019. статья №055069

*Публикации в прочих изданиях:*

4 Луцкий, Д.С. Анализ способов определения концентрации рения в сложных гетерогенных и гомогенных системах / Д.С. Луцкий, **А.С. Игнатович**, Р.Р. Хисматуллин // Научные исследования – 2018. – №4(24). – С.8-11.

5 Ignatovich, A. Extraction of copper and silver from ammoniacal leaching solutions of copper smelting slag / **A.S. Ignatovich** // Scientific Reports on Resource Issues. – Freiberg, Germany: IUR Office, 2018. – Volume 1. – P.203-209

6 Луцкий, Д.С. Особенности фотометрического определения содержания рения в растворах сложного состава / Д.С. Луцкий, **А.С. Игнатович**, Р.Р. Хисматуллин // Научные исследования – 2019. – №3(29). – С.4-7.

7 Ignatovich, A.S. Extraction of rhenium from ammoniacal leaching solutions of copper smelting slag and model solutions / **A.S. Ignatovich**, D.S. Lutskiy, R.R. Khismatullin // Journal of mining and geological sciences. – 2019 – 62(2) – P.129-131

*Заявка на изобретение:*

8. Заявка на изобретение «Способ экстракционного извлечения меди из растворов аммиачного выщелачивания шлаков медеплавильных производств» / **А.С. Игнатович**, Д.С. Луцкий. Регистрационный номер 2021109710 от 08.04.2021 г.; заявитель: ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный университет".