

На правах рукописи

Серебряков Максим Александрович



**РАЗРАБОТКА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОНДИЦИОННЫХ
МЕДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДИСТЫХ
ПЕСЧАНИКОВ**

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

А в т о р е ф е р а т
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ-2018

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

Научный руководитель –
доктор технических наук

Петров Георгий Валентинович

Официальные оппоненты:

Федосеев Игорь Владимирович

доктор технических наук, акционерное общество «Научно-производственный комплекс «Суперметалл» имени Е.И. Рыввина», консультант по научной деятельности и инновациям

Украинцев Илья Валерьевич

кандидат химических наук, акционерное общество "Научно-проектное объединение "РИВС", департамент гидрометаллургии, директор

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита диссертации состоится 13 декабря 2018 г. в 18 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.224.03 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 12 октября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БРИЧКИН
Вячеслав Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Россия занимает седьмое место в мире по добыче меди, ежегодно обеспечивая около 4 % мирового рудничного производства.

Структура отечественной сырьевой базы меди (98 млн. т балансовых запасов) характеризуется преобладанием сульфидных медно-никелевых месторождений (33,4 % запасов). Однако большой интерес в качестве перспективного сырья представляют запасы медистых песчаников (20,3 %) Удоканского месторождения и медно-порфировые месторождения (16,9 % запасов).

Флотационное обогащение медистых песчаников влечет за собой образование некондиционных медных концентратов, с содержанием ценного компонента 5-15 %. Пирометаллургическая переработка таких концентратов на черновую медь повлечет большие затраты и безвозвратное техногенное рассеяние ценных компонентов. Перспективным направлением модернизации традиционных технологий переработки некондиционных медных концентратов на основании принципов энерго- и ресурсоэффективности, наряду с максимальным использованием возможностей, связанных с обогатительным циклом, является их совершенствование с применением гидрометаллургических процессов.

Степень разработанности исследуемого направления: Различным аспектам химии, обогащения и металлургической переработки рудного медьсодержащего сырья посвящены исследования известных отечественных и зарубежных ученых, среди которых следует выделить работы С.С. Набойченко, Я.М. Шнеерсона, В.А. Чантурия, С.Б. Садыкова, В.И. Горячкина, Л.В. Чугаева, М.И. Калашниковой, М.Е. Wadsworth, К.Г. Thomas, однако, значительный круг вопросов, связанный с переработкой некондиционных медных концентратов остается недостаточно изученным.

Цель исследований: Разработка технологических решений, обеспечивающих эффективное извлечение ценных компонентов

(меди, серебра и рения) из некондиционных концентратов обогащения медистых песчаников.

Задачи исследования включают:

1. Изучение вещественного состава некондиционного медного концентрата;

2. Термодинамический анализ взаимодействия сульфидных и ферритных компонентов концентрата в различных средах и выбор перспективных реагентов для выщелачивания меди;

3. Определение оптимальных параметров и кинетических характеристик процесса автоклавного аммиачного выщелачивания медных концентратов с низким содержанием ценного компонента.

4. Разработка метода выделения меди при переработке аммиачных растворов автоклавного выщелачивания;

6. Разработка технологии извлечения меди и серебра из некондиционного медного концентрата, обеспечивающей получение высококачественного медного концентрата удовлетворяющего требованиям электролизного производства.

7. Предварительная экономическая оценка технологии аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата полученного путем обогащения медистых песчаников.

Научная новизна работы:

1. Установлены основные кинетические закономерности автоклавного окисления сульфидов меди, серебра и рения в аммиачной среде в присутствии окислителя.

2. Установлено, что основными факторами автоклавного выщелачивания обеспечивающими высокое вскрытие сульфидов меди, рения и серебра являются концентрации аммиака в растворе и температура.

3. Выявлено, что механизм и порядок растворения основных сульфидных компонентов некондиционных концентратов медистых песчаников остается постоянным при варьировании окислительных условий процесса.

4. Установлено, что снижение концентрации растворенного аммиака при его отгонке из растворов автоклавного выщелачивания

способствует гидролизу аммиаков меди и полному селективному осаждению меди в форме оксида.

Практическая значимость работы:

1. Определены параметры одностадийного аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата, обеспечивающие селективное извлечение в раствор не менее 96% меди, 86% серебра и 91% рения.

2. Предложен метод переработки рений содержащих растворов автоклавного выщелачивания, включающий в себя сорбцию рения на анионите с последующей десорбцией в виде перрената аммония.

3. Разработаны технические решения по кондиционированию некондиционного медного концентрата, реализация которых позволит достичь существенного повышения качества медного концентрата, а также обеспечить получение дополнительной продукции, что способствует энерго- и ресурсосбережению при переработке медистых песчаников.

Методы исследований. Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий кафедры металлургии Горного университета. Лабораторные экспериментальные исследования по автоклавному окислению проводились в автоклавной установке Рагг. Подачу и регулирование расхода газа в автоклав осуществляли с помощью системы контроля и регулирования давления «Bronkhorst».

Определение химического состава исходных проб и полученных в ходе исследований продуктов изучался с использованием масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре Spectrace 5000 Tracor X-ray и атомно-абсорбционным методом, а также методами титриметрии и потенциометрии.

Минеральный состав изучался на оптическом микроскопе Zeiss; химический состав минералов и минеральных фаз определен на растровом электронном микроскопе CamScanS4 с энергодисперсионным спектрометром и системой микроанализа ISIS Oxford Instruments. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов обеспечена большим объемом

экспериментальных исследований, применением современных методов анализа, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Автоклавное аммиачное вскрытие (140°C , 2 часа) некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников обеспечивает извлечение в раствор не менее 96% меди, 95% рения и 86% серебра с концентрированием железа в нерастворимом остатке.

2. Термическое разложение аммиакатов меди из растворов автоклавного аммиачного выщелачивания при температуре 90°C и расходе барботируемого воздуха равного $0,035 \text{ дм}^3/\text{мин}$ обеспечивает осаждение меди в форме оксида не менее 95 % и отгонку 99 % аммиака.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается их соответствием известным тенденциям развития автоклавной гидрометаллургии. Доказывается с позиций современной теории гидрометаллургических процессов и существующей практики применения автоклавного выщелачивания, обеспечена большим объемом экспериментальных исследований, применением высокотехнологичных методов физико-химического анализа и обработки теоретических и экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертации обсуждались на III международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке»; на Научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки 2016»; на XIII Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство»; на 67 Международной конференции по металлургии и горному делу во Фрайбергской горной академии; на VI Международной научно-практической конференции «Научный диалог: Вопросы точных и технических наук»; на Научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки 2017».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 научных работ, в том числе 2 работы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Личный вклад автора включает определение целей и задач исследования, выбор и обоснование направления исследований по материалам анализа научно-технической и патентной литературы, теоретическую и методическую проработку выбранного направления работ, выполнение экспериментальных исследований, обработку и анализ результатов лабораторных исследований, разработку технических решений по переработке некондиционного медного концентрата, апробацию полученных результатов и их подготовку к публикации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, включающего 102 наименования. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 39 таблиц и 55 рисунков.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю, доктору технических наук Г.В. Петрову; доценту кафедры металлургии, кандидату технических наук А.Я. Бодуэн, а также коллективу кафедры металлургии Санкт-Петербургского горного университета за внимание, содействие и поддержку на различных этапах выполнения диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводятся анализ актуальности и своевременности работы, определены и сформулированы цель и задачи исследовательской работы, научная новизна и практическая ценность результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе излагаются данные о современном состоянии минерально-сырьевого комплекса меди в России и странах входящих в Евразийское экономическое сообщество. Отражены ключевые моменты устройства сырьевой базы стран входящих в Евразийское экономическое сообщество и показано, что

многообещающим направлением модернизации действующих технологий переработки некондиционных медных концентратов, является применение гидрометаллургических технологий. Поставлены основные научные и практические задачи исследовательской работы.

Во второй главе представлены результаты исследования вещественного состава исходного сырья; кинетических характеристик и механизма аммиачного автоклавного выщелачивания из некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников в диапазоне температур $(120 \div 180)^\circ\text{C}$ и давлении кислорода $(0,2 \div 0,8)$ МПа; термодинамической оценки протекания аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата. Приведена методика и результаты экспериментальных исследований аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата, определены параметры проведения одностадийного аммиачного автоклавного выщелачивания, позволяющие достичь селективного извлечение меди, серебра и рения в раствор.

В третьей главе описывается методика и приводятся результаты экспериментальных исследований по переработке растворов автоклавного выщелачивания методом термического разложения аммиаков меди с получением медного концентрата с содержанием ценного компонента не менее 70 % и регенерацией аммиака.

В четвертой главе представлены принципиальная и аппаратурно-технологическая схемы, рассчитаны технологические и экономические показатели предприятия переработки некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников.

В заключении приведены основные выводы по результатам исследований и даны рекомендации в соответствии с целью и решенными задачами.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Автоклавное аммиачное вскрытие (140 °С, 2 часа) некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников обеспечивает извлечение в раствор не менее 96% меди, 95% рения и 86% серебра с концентрированием железа в нерастворимом остатке.

Для проведения исследований использовался некондиционный медный концентрат обогащения медистых песчаников Жезказганской ОФ.

Химический состав пробы концентрата Жезказганского месторождения приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав исходного концентрата ЖОФ

Шифр концентрата	Содержание, %						
	Cu	Zn	Pb	Fe	S	Ag, г/т	Re, г/т
ЖК-0/1	5,14	1,32	1,01	5,2	6,3	83,9	3,5

Минеральный состав руд Жезказганского месторождения (рисунок 1) сконцентрирован в трех широко распространенных минералах - халькопирите, борните и халькозине. Для руды Жезказганского месторождения характерно присутствие свинца, цинка, серебра и рения. Сереброносность возрастает в следующем ряду минералов: галенит - халькопирит - борнит - халькозин. Рений связан с сульфидами меди, максимальные его содержания установлены в борните.

Для некондиционных медных концентратов, полученных при обогащении руд Жезказганского месторождения характерно следующее распределение меди по минеральным составляющим, %: халькозин - 50, борнит – 40, халькопирит – 10.

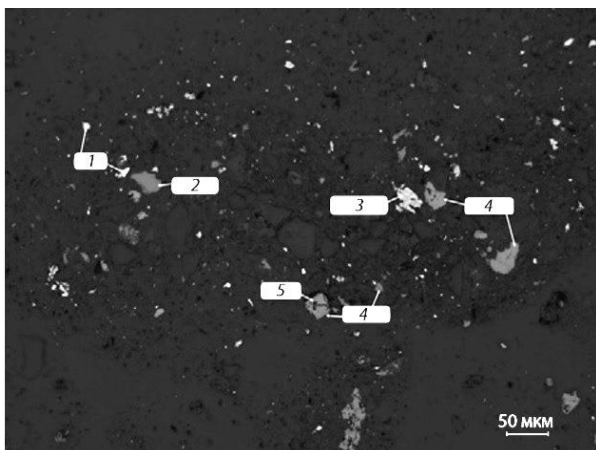


Рисунок 1 - Характерные сростки сульфидных минералов в пробе ЖК-0/1.
1-пирит; 2-сфалерит; 3-халькопирит; 4-халькозин; 5-борнит

Гранулометрический анализ исходного сырья выполнялся на лазерном анализаторе Microsizer 201С. Прибор дает возможность идентифицировать крупность частиц исследуемого материала в диапазоне (0,2÷600) мкм.

По результатам анализа концентрат имеет типичную для флотационных концентратов крупность частиц (Таблица 2 и 3).

Таблица 2 - Соответствие размеров частиц (D, мкм) заданным значениям весовых долей

D, мкм	1,26	2,24	3,52	5,48	8,73	14,9	27,2	43,4	61,7	150
P, %	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	90,0	100

Таблица 3 - Соответствие весовых долей частиц (P, %) заданным значениям размеров частиц

P, %	38,1	53,4	64,3	72,0	80,4	89,8	94,7	96,2	99,0
D, мкм	5,0	10,0	20,0	30,0	44,0	61,0	74,0	80,0	100

Согласно результатам, выполненных термодинамических расчетов вероятность вскрытия сульфидов меди и оксида серебра в аммиачном растворе высока, о чем свидетельствуют отрицательные значения энергии Гиббса, а также изменения энергии Гиббса реакций образования аммиачных комплексов меди, в интервале температур (273÷473) К возможно образование координационных соединений с различным числом молекул аммиака во внутренней сфере. Наиболее вероятно образование тетрааммиачного комплекса цинка $Cu(NH_3)_4^{2+}$ (Рисунок 2), что согласуется с известными литературными данными.

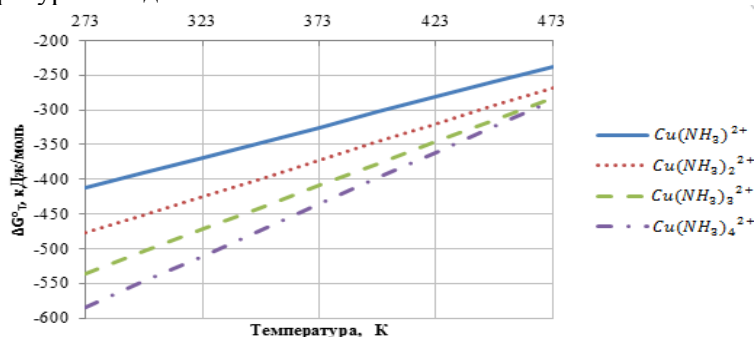


Рисунок 2 - Изменения энергии Гиббса для реакций образования аммиачных комплексов меди

Определение кинетики протекания процесса автоклавного вскрытия медного концентрата с низким содержанием ценного компонента проводилось на лабораторном автоклаве емкостью 1000 мл. Установка оснащена титановым реактором,

автоматизированной системой контроля температуры, давления внутри реактора и регулировкой подачи газообразного реагента.

По результатам проведенного экспериментального исследования по определению кинетических характеристик аммиачного автоклавного выщелачивания были получены данные, которые позволяют построить графики зависимостей извлечения меди в раствор от времени при различном парциальном давлении кислорода (Рисунок 3 и 4).

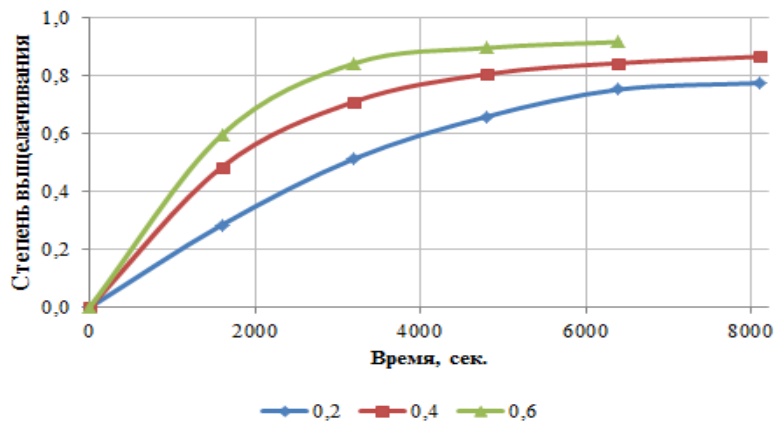


Рисунок 3 – Кинетические зависимости автоклавного выщелачивания меди при различном парциальном давлении кислорода и $T = 413\text{ K}$

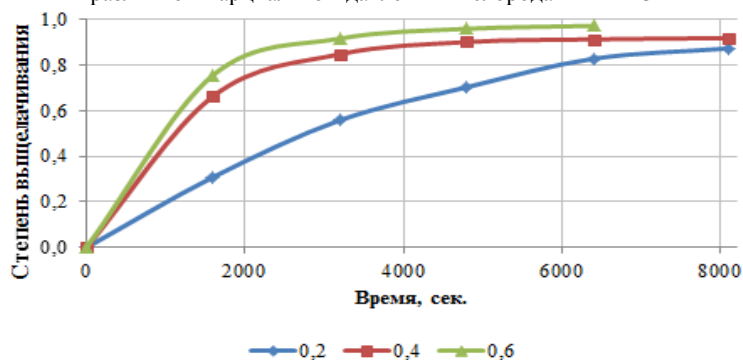


Рисунок 4 – Кинетические зависимости автоклавного выщелачивания меди при различном парциальном давлении кислорода и $T = 433\text{ K}$

Расчет основных кинетических характеристик вскрытия некондиционного медного концентрата (температура (120÷180) °С, давление кислорода (0,2÷0,8) МПа) проводился по классическому методу и методу «сжимающегося ядра», которые дают сравнимо идентичные результаты: для кажущейся энергии активации – (57,1÷74,4) кДж/моль и для порядка реакции по кислороду - 0,77÷0,93. Концентрация кислорода в растворе при установленном парциальном давлении рассчитывалась согласно следующей зависимости:

$$C_{aq} = P_{O_2} \exp \left\{ \frac{0.0467T^2 + 203.3577 \ln \left(\frac{T}{298} \right) - (298.378 + 0.0927T)(T - 298) - 20.591 \cdot 10^3}{8.3144T} \right\} \quad (1)$$

где C_{aq} – растворимость кислорода в воде, моль/л;
 P_{O_2} – парциальное давление кислорода, атм.;
 T – температура, К.

Для определения кажущегося порядка реакции на основании экспериментальных данных были получены зависимости $1-(1-\alpha)^{1/3} = f(\tau)$ следующего вида (Рисунок 5 и 6).

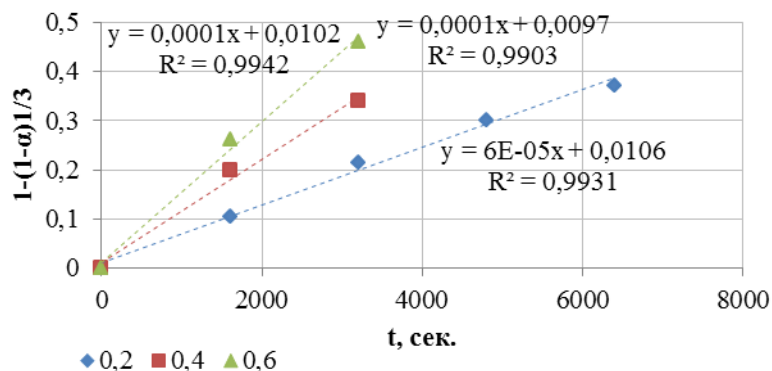


Рисунок 5 - Зависимость $1-(1-\alpha)^{1/3}=f(\tau)$ для определения кажущегося порядка реакции по кислороду при 413 К

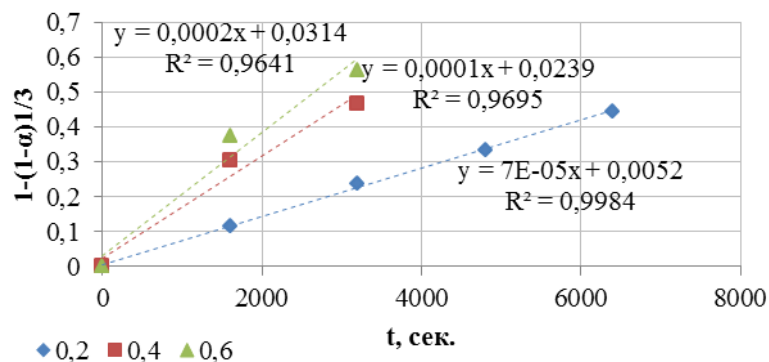


Рисунок 6 - Зависимость $1-(1-\alpha)^{1/3}=f(\tau)$ для определения кажущегося порядка реакции по кислороду при 433 К

Основываясь на экспериментальных данных, полученных при исследовании аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата Жезказганской обогатительной фабрики, удалось достичь достаточно высокой степени выщелачивания меди в раствор ($96,13 \div 94,88$) % при низком извлечении железа ($0,6 \div 8,0$) % (рисунок 7).

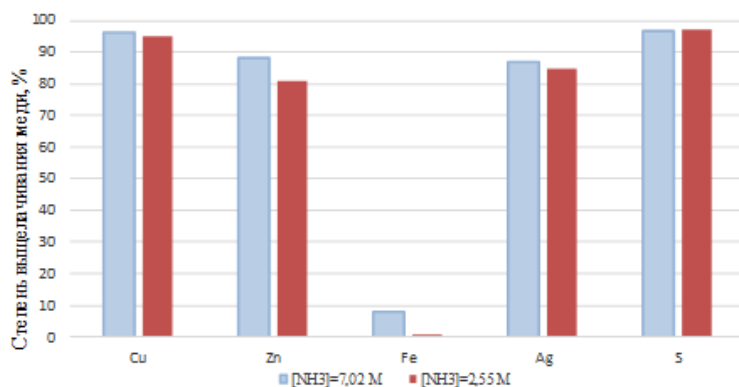


Рисунок 7 – Зависимость извлечения ценных компонентов в раствор при $(\text{NH}_3)=7,02$ и $2,55$ моль/л и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4=50$ г/л

Содержание аммиака в растворе равное 2,55 моль/л позволяет провести глубокое вскрытие некондиционного медного концентрата и селективно извлечь основные ценные компоненты в раствор, добиться минимального извлечения железа, при невысоком расходе реагентики, что исключает опасность образования взрыво-пожароопасной смеси аммиака с кислородом.

Таким образом, получены следующие параметры автоклавного аммиачного выщелачивания: температура автоклавного выщелачивания – 140 °С; удельный расход кислорода – 46,1 нм³/т; парциальное давление кислорода - 0,6 МПа; продолжительность автоклавного вскрытия – 2 ч; концентрация аммиака - 2,55 моль/дм³; концентрация сульфата аммония – 50 г/дм³.

2. Термическое разложение аммиакатов меди из растворов автоклавного аммиачного выщелачивания при температуре 90 0С и расходе барботируемого воздуха равного 0,035 дм³/мин обеспечивает осаждение меди в форме оксида не менее 95 % и отгонку 99 % аммиака

Исследование проводилось с применением математического планирования эксперимента на основе линейной матрицы для полного факторного эксперимента вида 2³.

Полином, полученный в ходе математического моделирования процесса термического разложения аммиакатов раствора после автоклавного выщелачивания некондиционного концентрата (x_1 - температура (70÷90) °С, x_2 - расход воздуха (0,01÷0,07) дм³/ч и x_3 - продолжительность процесса (120÷180) мин.), позволяет предсказывать влияние технологических параметров процесса на степень отгонки аммиака с высокой точностью:

$$Y = 44,03 + 24,58 x_1 + 14,9 x_2 + 6,88 x_3 + 3,02 x_1 x_2 + 3,12 x_1 x_3 + 3,12 x_2 x_3$$

По результатам проведенной серии экспериментов были получены раствор с остаточным содержанием аммиакатов, твердый остаток (таблица 4) и водный раствор аммиака.

Таблица 4 - состав твердых остатков термического разложения аммиакатов

№	Продукт	Содержание, %			
		Cu	Ni	Zn	Fe
1	CuO	77,2	0,53	0,14	0,5
2	CuO + Cu ₄ (OH) ₆ SO ₄	70,1	0,76	-	0,2

Термическое разложение аммиакатов меди из растворов автоклавного выщелачивания некондиционного концентрата Жезказганской обогатительной фабрики при температуре 90 °С и расходе воздуха 0,035 дм³/ч сопровождается практически полным осаждением меди в виде оксида и отгонкой 99 % аммиака в газовую фазу. Представленные в работе теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать предполагаемую технологическую схему переработки некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников (Рисунок 8).

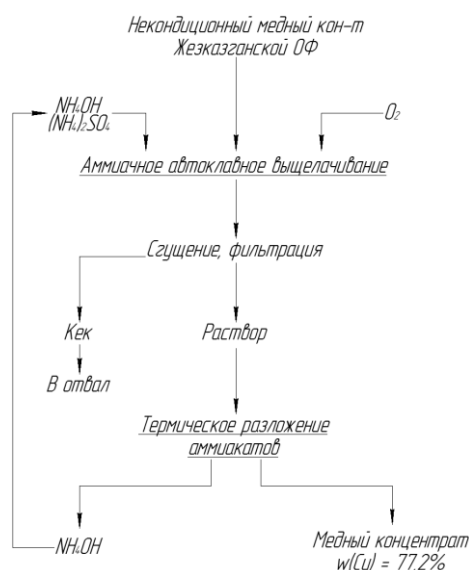


Рисунок 8 – Принципиальная схема переработки некондиционного медного концентрата

Аппаратурная схема переработки некондиционного концентрата обогащения медистых песчаников (Рисунок 9) предполагает работу 4 параллельно подключаемых автоклавов емкостью 125 м³; 3 сгустителей; 3 пресс-фильтров; 7 герметичных реакторов с механическим перемешиванием для термического разложения аммиаков и задействование скруббера для сорбции отгоняемого аммиака с последующей подачей на приготовление пульпы.

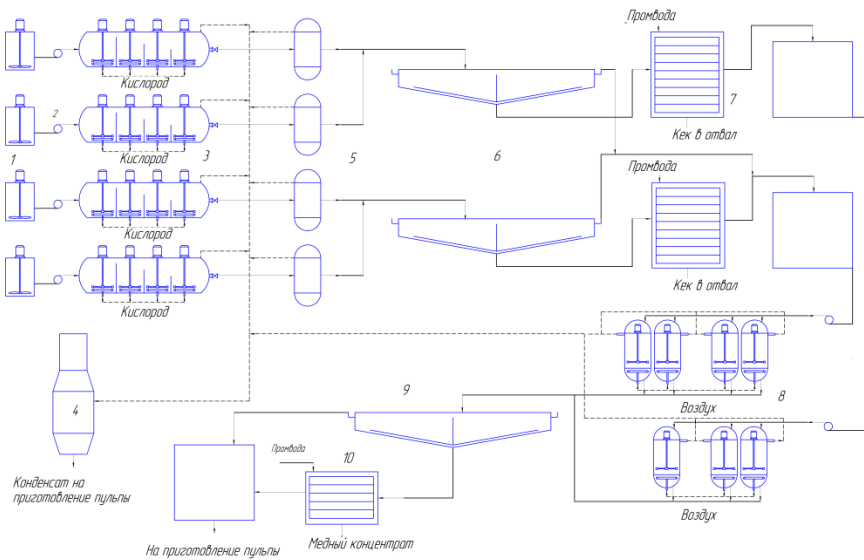


Рисунок 9 – Аппаратурная схема переработки низкокачественного медного концентрата обогащения медистых песчаников

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты представленной исследовательской работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. В некондиционном медном концентрате Жезказганского месторождения медь представлена в трех широко распространенных минералах - халькопирите, борните и халькозине. Для руды Жезказганского месторождения характерно присутствие свинца, цинка, серебра и рения.

2. В исследованном диапазоне температур и давлений определены основные кинетические характеристики аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного концентрата обогащения медистых песчаников, энергия активации находится в интервале (57,1÷74,4) кДж/моль, порядок реакции по кислороду - в интервале (0,77÷0,93). Термодинамическая оценка вероятности протекания процесса показала, что значения энергии Гиббса отрицательны как при 298 К так и при 413 К, что свидетельствует о возможности аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата.

3. Установлены параметры ведения операции аммиачного автоклавного выщелачивания ($T=140$ °С; удельный расход кислорода – 46,1 нм³/ч; $P(O_2) = 0,6$ МПа) позволяющие достичь наиболее полного извлечения меди, серебра и рения в раствор в виде аммиачных комплексов при низком переходе железа, что дает возможность организации одностадийного процесса аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников.

4. Предложен метод переработки растворов автоклавного выщелачивания основанный на термическом разложении аммиаков, позволяющий осаждать медь в виде оксида и содержанием меди не менее 70 %. Экспериментально определена модель процесса термического разложения аммиаков в диапазоне температур (70÷90) °С; расходе воздуха (0,01÷0,07) дм³/мин и продолжительности процесса (120÷240) мин.

5. По результатам проведенных экспериментальных и теоретических изысканий представлена принципиальная

технологическая схема переработки некондиционного медного концентрата обогащения медистых песчаников, включающая аммиачное автоклавное выщелачивания, термическое разложение аммиаков раствора автоклавного выщелачивания.

6. Для представленной схемы материальных потоков цеха с производительность по исходному сырью 400 000 т/год и выбранного оборудования были проведены расчеты экономических показателей. Экономическим эффектом от практического применения технологии по гидрометаллургической переработки некондиционных концентратов обогащения медистых песчаников, в случае внедрения в существующую технологию, станет выпуск богатого медного концентрата с содержанием меди не менее 70 % и дополнительный ежегодный доход - 898, 33 млн. руб. Таким образом срок окупаемости цеха по гидрометаллургической переработке некондиционных концентратов обогащения медистых песчаников составит 7,2 года.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. Петров, Г.В. Исследование аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата, содержащего серебро и рений / Г.В. Петров, А.Я. Бодуэн, Б.С. Иванов, М.А. Серебряков // Цветные металлы. - 2016. - №10. - С. 23-28

2. Солоденко, А.А. Исследование аммиачного автоклавного выщелачивания применительно к некондиционным концентратам Жезказганского месторождения / А.А. Солоденко, В.В. Васильев, А.Б. Солоденко, М.А. Серебряков // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. - №2. - С. 266-276

В прочих изданиях:

3. Serebryakov, M.A. A study of a possibility of a one-stage selective extraction of ag, cu and re from low-quality copper-containing feed stream into a solution / M.A. Serebryakov, G.V. Petrov,

А.Уа. Boduen // 67th berg- und huttenmannischer tag 2016. - 2016. - С. 63-68

4.Серебряков, М.А. Исследование аммиачного автоклавного выщелачивания некондиционного медного концентрата, содержащего серебро и рений / М.А. Серебряков, С.Б. Фокина, Г.В. Петров, А.Я. Бодуэн // III международная научно-практическая конференция «промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» Тезисы докладов. - 2016. - С. 127-130

5.Бодуэн А.Я. Применение автоклавного выщелачивания для некондиционных рудных концентратов, содержащих медь и цинк / А.Я. Бодуэн, М.А. Серебряков, К.В. Лешукова // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. Часть 1. - 2017. - С. 95-97