

На правах рукописи

Яковлева Татьяна Александровна



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ
КОМПЛЕКСНЫХ МЕДНЫХ РУД НА ОСНОВЕ
ДАННЫХ ИОНОСЕЛЕКТИВНЫХ СЕНСОРОВ**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

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

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Ромашев Артём Олегович

Официальные оппоненты:

Горлова Ольга Евгеньевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, профессор;

Никитин Роман Михайлович

кандидат технических наук, Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», учёный секретарь.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет», г. Чита.

Защита диссертации состоится **25 декабря 2024 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.5 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

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

Автореферат разослан 25 октября 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НИКОЛАЕВА
Надежда Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время на обогатительных фабриках перерабатываются комплексные медные руды с низкими содержаниями полезных компонентов. Разработка эффективной технологии переработки для таких руд вызывает трудность в виду сложности минералогического состава и необходимости учёта многих факторов. Основным методом обогащения данного типа руд является флотация. Флотация как метод обогащения включает в себя химические, физические и физико-химические свойства изучаемого объекта. Поэтому для выявления каких-либо негативных факторов, влияющих на процесс флотации, необходима широкая аппаратная база для осуществления экспресс оценки состояния флотационного процесса.

Степень разработанности темы исследования

Вопрос оптимизации процесса флотации, на основе ионометрии, поставлен еще в 1933-1934 годах, когда Я.В. Уорк и А.Б. Кокс впервые провели исследования по взаимосвязи краевого угла смачивания и значений водородного показателя при флотационном процессе. В дальнейшем вопросами развития теории и практики данного направления посвящены работы зарубежных и отечественных ученых, таких как И.Н. Плаксин, В.А. Чантурия, Т.Н. Александрова, О.Е. Горлова, А.А. Абрамов, Г.А. Хан, А.М. Годен и многих других. Значительное внимание уделено практике флотации комплексных медно-колчеданных руд в работах В.А. Бочарова. Также в работах В.А. Игнаткиной описаны потенциометрические исследования взаимодействия катионов тяжелых металлов с сульфгидрильными собирателями в водном растворе (перепад значений потенциала ионоселективного электрода соотносится с термодинамической константой равновесия образования малорастворимых соединений; перепад значений платинового

электрода соотносится с окисляемостью собирателей). На базе рассмотренных трудов можно сделать вывод о том, что применение методов прямой потенциометрии и статистического анализа для обработки многомерных данных позволяет более широко описывать технологический процесс и усовершенствовать автоматический контроль управления флотационным обогащения. Также данные исследования позволяют рассмотреть процесс флотации в области контроля электрохимических свойств и типизации сырья по данным признакам.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых по пунктам: п. 3. «Повышение контрастности технологических свойств разделяемых минералов. Физические, физико-химические и химические процессы разделения, концентрации и переработки минералов, руд, промежуточных продуктов переработки природного и техногенного сырья»; п.7. «Моделирование, контроль, цифровизация, автоматизация технологических процессов обогащения, их оптимизация».

Объект исследования. Процессы флотационного обогащения комплексных медных руд.

Предмет исследования. Технологические параметры процесса флотационного обогащения комплексных медных руд.

Цель работы. Повышение эффективности флотационного обогащения путём направленного управления процессом дозировки флотореагентов на основании данных ионоселективных сенсоров.

Идея работы. Селективность флотационного обогащения комплексных медных руд достигается за счёт использования системы контроля на основании электрохимических свойств пульпы.

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

1. Анализ действующих методов оценки работы предприятий по переработке комплексных медных руд и систематизация способов автоматического регулирования процессов флотации;

2. Разработка, теоретическое обоснование и экспериментальная верификация методики проведения исследований на обогатимость, с учётом электрохимических параметров и применением современных методов численного моделирования;

3. Экспериментально-теоретические исследования флотационного обогащения комплексных медных руд;

4. Применение разработанного принципа управления дозировкой флотационных реагентов в условиях работы фабрики;

5. Оценка экономической рентабельности предлагаемых решений по повышению эффективности переработки комплексных медных руд.

Научная новизна работы:

1. Установлены численные зависимости извлечения и эффективности флотационного обогащения от распределенной дозировки и времени агитации модификатора Na_2S , регулируемые значениями потенциала Ag_2S электрода.

2. Экспериментально установлены диагностические модели отклика значений потенциалов ионоселективных сенсоров на концентрацию реагентов в пульпе и разработана методика исследований руд на обогатимость флотационным методом, позволяющая повысить селективность обогащения.

3. Предложена и экспериментально обоснована функциональная схема управления процессом флотации с применением ионоселективных сенсоров, позволяющая

стабилизировать качество получаемых концентратов в динамических условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Предложен и реализован подход к изучению электрохимических свойств перерабатываемого сырья, позволяющий установить расходы флотореагентов для достижения целевых технологических показателей. Разработанная программа для ЭВМ «Программа для выбора ионоселективных сенсоров на основе данных калибровки» (патент РФ № 2023680109 от 14.09.2023), позволяющая рассчитывать коэффициенты электрохимических моделей и идентифицировать состав набора ионоселективных сенсоров для проведения исследований. Предложен способ необходимой дозировки флотореагентов с учетом минералогического состава руды в условиях обогатительной фабрики, позволяющий стабилизировать качество получаемого концентрата. Научные результаты исследований использованы в учебном процессе Факультета переработки минерального сырья «Санкт-Петербургского горного университета для студентов специальности «Обогащение полезных ископаемых» при проведении занятий по дисциплинам «Флотационные методы обогащения», «Технология переработки руд цветных металлов». Результаты диссертационного исследования использованы в деятельности ООО «НОВОМЭК ИНЖИНИРИНГ» (акт о внедрении результатов кандидатской диссертации от 30 сентября 2024 года) при проведении научно-исследовательских работ. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 19-17-00096).

Методология и методы исследования.

Проведение исследований по изучению обогатимости комплексной медной руды проводилось на лабораторной базе НЦ «Проблем переработки минерального сырья» Горного университета императрицы Екатерины II. Анализ содержания

компонентов в исходных пробах и в продуктах обогащения проводился с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-7000, фирмы Shimadzu, Япония. Лабораторные опыты проводились с применением лабораторной мельницы МШЛ-7 фирмы НПК «Механобр-техника», Россия; пневмомеханических флотомашин фирмы НПК «Механобр-техника» и фирмы «Laarmann», Россия. Также в работе в рамках исследования были применены методы нейросетевого моделирования с помощью программного пакета Statistica. Для написания программы ЭВМ был применён объектно-ориентированный язык программирования Python 3.8.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Способ флотации с дозировкой сернистого натрия на основе использования данных ионоселективных сенсоров с учетом установленного диапазона значений потенциала Ag_2S электрода позволяет снизить потери металлов с хвостами и повысить эффективность процесса флотационного обогащения.

2. Разработанная адаптивная система управления дозировкой флотационных реагентов в условиях изменчивости состава перерабатываемого сырья на основе данных ионоселективных сенсоров позволяет стабилизировать качество получаемых концентратов и повысить технологические показатели.

Степень достоверности результатов исследования

основывается на представительности и сходимости достаточного объёма проведённых экспериментальных исследований; статистической оценке полученных данных методами математического анализа; применении современных средств измерения и современного оборудования, а также

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XIX всероссийская конференция-конкурс

студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», 12-16 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург; XVIII международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования» 16-20 мая 2022 г., г. Санкт-Петербург;

Личный вклад автора состоит в формулировке цели и постановке задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по существующим технологиям флотационного обогащения комплексных медных руд и методов автоматического контроля; непосредственном выполнении лабораторных исследований по флотации, определению минерального и химического состава проб, с последующей обработкой и статистической интерпретацией полученных результатов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, 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, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 168 источников. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста и содержит 60 рисунков, 32 таблицы, 2 приложения и список условных обозначений и сокращений.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность коллективу кафедры обогащения полезных ископаемых за неоценимую

помощь в работе, наставления и поддержку, а также за содействие при проведении диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

В первой главе представлен анализ существующих систем автоматического регулирования процессов флотации с помощью изучения электрохимических параметров пульпы. Выявлено, что принципы автоматического контроля построены на регулировании только лишь водородного показателя, что значительно ограничивает описание происходящих процессов во флотационной пульпе. Модернизация флотационных схем с помощью внедрения систем электрохимического контроля позволяет формировать модели различных нелинейных и трудно описываемых систем, которые в свою очередь помогают более обширно описывать процессы, происходящие в пульпе. Данные методы позволяют исключить ошибки в управлении флотационным процессом. Исходя из результатов проведённого анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе обоснован выбор комплексных медных руд Забайкальского края Российской Федерации как объекта исследования. Установлена задача флотационного передела таких руд - максимизация извлечения сульфидных минералов. Обоснован комплекс методов исследования особенностей вещественного состава руд, процессов измельчения и флотации комплексных медных руд.

В третьей главе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований флотационного обогащения комплексных медных руд. Для установления особенностей

флотации исследуемой руды проведено сравнение двух методик проведения исследований на обогатимость комплексных медных руд. Классический метод с помощью факторного эксперимента позволил установить реагентный режим флотации для данного типа руд. Метод проведения электрохимических исследований позволил уменьшить расход применяемых реагентов и повысить технологические показатели.

В четвертой главе рассмотрены результаты применения разработанной адаптивной системы управления дозировкой флотационных реагентов в условиях обогатительного предприятия. Также представлен анализ сменных данных предприятия с помощью методов углубленной статистики.

В пятой главе приведены результаты экономической оценки эффективности предлагаемых технологических решений по переработке комплексных медных руд. Проведен анализ чувствительности индекса доходности от основных влияющих факторов.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Способ флотации с дозировкой сернистого натрия на основе использования данных ионоселективных сенсоров с учётом установленного диапазона значений потенциала Ag_2S электрода позволяет снизить потери металлов с хвостами и повысить эффективность процесса флотационного обогащения.

В ходе проведения исследований была изучена представительная проба комплексной медной руды. Содержание меди составило 0,79%. Рудная часть представлена окислами железа (33,4%) и сульфидными минералами (4,2%). К главным сульфидным минералам в пробе относятся халькопирит (53,4% отн.) и пирит (32,2% отн.).

Для определения реагентного режима и технологических показателей в лабораторных условиях было проведено

сравнение двух подходов к исследованию руды на обогатимость флотационным методом: постановка факторного эксперимента и исследования с использованием данных прямой потенциометрии.

Для реализации первого подхода был составлен D-оптимальный план, включающий 20 опытов в различных точках факторного пространства. В ходе данного эксперимента были найдены оптимальные значения расходов применяемых реагентов. Относительная погрешность по сравнению с данными модели составила 2,05%.

Для подтверждения полученных данных дополнительно были проведены серии опытов с найденными значениями расходов, усредненные результаты (каждый опыт повторялся 3 раза) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Усреднённые результаты открытых флотационных опытов

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %		
		Cu	Fe	S
к-т 1 основной фл	3,51	12,03	24,1	35,47
к-т 2 основной фл	2,45	5,785	17,39	13,54
к-т 3 основной фл	2,38	0,64	15,86	4,45
Суммарный к-т	8,34	6,94	19,77	20,19
Отвальные хвосты	91,66	0,23	23,86	0,87
Руда	100,00	0,79	23,52	2,48
Наименование продуктов	Выход, %	Извлечение, %		
		Cu	Fe	S
к-т 1 основной фл	3,51	53,45	3,60	50,20
к-т 2 основной фл	2,45	17,94	1,81	13,38
к-т 3 основной фл	2,38	1,93	1,60	4,27
Суммарный к-т	8,34	73,32	7,01	67,85
Отвальные хвосты	91,66	26,68	92,99	32,15
Руда	100,00	100,00	100,00	100,00

В ходе проведения данных опытов был выбран расход реагентов Na₂S и ксантогената (VtX) 50 г/т и 100 г/т соответственно.

В результате проведения факторного эксперимента удалось получить черновой концентрат с содержанием и

извлечением меди 6,94% и 73,29% соответственно. Эффективность обогащения по критерию Ханкока-Луйкена составила 65,47 %.

В дальнейшем для повышения эффективности переработки данного типа сырья были проведены опыты по исследованию на обогатимость с использованием контроля электрохимических параметров. Для проведения данных исследований была разработана обобщённая схема проведения исследования с использованием ионоселективных сенсоров представленная на рисунке 1. Данная схема состоит из 3-х этапов: 1 этап – выбор и калибровка ионоселективных сенсоров; 2 этап – изучение измельчаемости; 3 этап – подбор расходов реагентов с помощью выбранной связки ионоселективных сенсоров. Этапы 1 и 2 проводятся при первоначальном исследовании пробы перед флотационным обогащением.

Для исследований использовались следующие электроды: рН характеризующий концентрацию водородных ионов; Pt – для определения окислительно-восстановительного потенциала измеряемой среды; Ag_2S – имеет широкий диапазон измерения (в данном исследовании использовался с целью определения достаточной дозировки Na_2S); Em (мембранный) имеет широкий диапазон измерения (в данном исследовании использовался с целью определения достаточной дозировки собирателя); Ag/AgCl – вспомогательный электрод. Подбор каждой пары осуществлялся в соответствии с запатентованной программой для ЭВМ.

На 3 этапе в ходе изучения исходных электрохимических параметров пульпы было выявлено смещение потенциалов Ag_2S и Pt электродов в отрицательную область. Данный факт может свидетельствовать о наличии в пульпе соединений $\text{Fe}(\text{OH})^+$ (в соответствии с диаграммой Пурбе для системы $\text{Fe}-\text{Cu}-\text{S}-\text{H}_2\text{O}$). Данные соединения оказывают негативный эффект

на извлечение сульфидных минералов, по причине пассивации их поверхности гидроксильными плёнками железа.

Для выявления необходимой дозировки реагента и с целью нейтрализации данных ионов, на основе проведённых исследований была создана обобщённая-регрессионная нейронная сеть и установлена функция отклика извлечения меди на показания Ag_2S электрода (рисунок 2). Статистическая оценка рассматриваемых параметров показывает, что происходит плавный прирост извлечения меди в диапазоне потенциала Ag_2S от -60 до -600 мВ. Скорость роста функции начинает замедляться в диапазоне от -400 до -500 мВ. Локальный максимум найденной аппроксимирующая функции достигается в точке -450 мВ.

Как видно из анализа данных, представленных на рисунке 2 дальнейшее уменьшение потенциала не влияет на извлечение, таким образом, дальнейшее дозирование реагента не рационально, а найденное значение потенциала Ag_2S электрода можно считать целевым.

Для определения необходимого времени агитации пульпы с реагентами была составлена многофакторная матрица, обеспечивающая применение методологии нейросетевого моделирования. В результате получена достоверная нейронная сеть, позволяющая осуществить поиск значений режимных параметров на цифровой модели без постановки дополнительных опытов.

Анализ данных показал, что с увеличением времени стабилизации рост извлечения носит линейный характер, а локальный максимум достигается при времени более 3 минут (рисунок 3). Дальнейшее повышение времени приводит к снижению извлечения, что объясняется передозировкой сернистого натрия и депрессией минералов меди. Таким образом, анализ полученных данных нейросетевой модели позволил сделать вывод, что необходимое время стабилизации

потенциала Ag_2S электрода на уровне -450 мВ составляет 3,2 минуты. При соблюдении данных условий для исследуемой руды происходит депрессия гидроксокомплексов железа. Расход ксантогената составил 100 г/т. Расход вспенивателя не менялся.

Для верификации полученных данных были произведены заверочные опыты. Дозировка Na_2S осуществлялась точно по показателям Ag_2S электрода до достижения найденного целевого значения и поддерживалась на данном уровне в течении установленного времени. Каждый опыт повторялся 3 раза, усреднённые результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Усреднённые результаты открытых флотационных опытов

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %		
		Cu	Fe	S
к-т 1 основной фл	3,58	17,08	18,86	35,36
к-т 2 основной фл	2,28	3,48	16,78	16,00
к-т 3 основной фл	2,24	1,15	15,78	5,93
Суммарный к-т	8,10	8,85	17,42	21,77
Отвальные хвосты	91,90	0,08	24,06	0,78
Руда	100,00	0,79	23,52	2,48
Наименование продуктов	Выход, %	Извлечение, %		
		Cu	Fe	S
к-т 1 основной фл	3,58	77,40	2,87	51,03
к-т 2 основной фл	2,28	10,03	1,63	14,71
к-т 3 основной фл	2,24	3,26	1,50	5,36
Суммарный к-т	8,10	90,70	6,00	71,10
Отвальные хвосты	91,90	9,30	94,00	28,90
Руда	100,00	100,00	100,00	100,00

В ходе проведения эксперимента с применением методов прямой потенциометрии содержание меди в черновом медном концентрате увеличилось с 6,94% до 8,89%, эффективность обогащения по критерию Ханкока-Луйкена составила 82,71 %. При поддержке установленного диапазона Ag_2S электрода расход реагента Na_2S был снижен на 30 %.

2. Разработанная адаптивная система управления дозировкой флотационных реагентов в условиях

изменчивости состава перерабатываемого сырья на основе данных ионоселективных сенсоров, позволяет стабилизировать качество получаемых концентратов и повысить технологические показатели.

Система дозирования и подачи реагентов является одной из подсистем автоматизированной системы управления технологическими процессами флотации. Необходимое количество подаваемого реагента в динамических условиях не является постоянной величиной и требует корректировки, так как в конечном итоге предопределяет достижение высокой селективности процесса.

На рисунке 4 представлен разработанный комплекс алгоритмов и технических средств функциональной схемы управления процессом флотации по ионным моделям. Данная схема состоит из двух адаптивных контуров: контур технологического аудита и контур управления реагентным режимом. Первый контур включает в себя проведение технологического аудита с помощью применения ионоселективных сенсоров, которые были подобраны с помощью разработанной обобщённой схемы исследования с использованием ионоселективных сенсоров. Выбор сенсоров, технологических параметров и идентификация диагностических моделей позволяет осуществлять управление реагентным режимом по ионному составу при колебании качества поступающей руды. Второй контур описывает алгоритм работы автоматизированного комплекса, включающего в себя пробоотборники, а также поточные и погружные камеры с ионоселективными сенсорами.

Работа данного комплекса была проверена в рамках динамических условий на действующем производстве Российской Федерации. Для проведения исследования с применением ионоселективных сенсоров была составлена карта точек измерений, которая основывается на расположении

основных узлов, в которых производится подача реагентов (рисунок 5).

По полученным результатам были построены зависимости между потенциалами аргентитового и платинового электродов (рисунок 6).

Из электродных функций, описывающих работу Pt и Ag_2S электрода в чистых растворах Na_2S , вытекает теоретическое выражение (1):

$$Eh(\text{Ag}_2\text{S})=Eh(\text{Pt})-208 \quad (1)$$

Данная диагностическая модель нанесена на рисунке 6.

Следовательно, необходимость дозировки реагента Na_2S может основываться на неравенстве, представляющем собой разность фактических показаний и полученных по диагностической модели (2):

$$\Delta pS=Eh(\text{Ag}_2\text{S})_{\text{факт}}-(-208+Eh(\text{Pt})_{\text{факт}})>10 \quad (2)$$

где ΔpS – разница между фактическими и расчётными (по модели 1) показаниями Ag_2S электрода.

Так же данное выражение даёт возможность косвенного распознавания вида присутствующих ионов в пульпе. Как видно из рисунка 6, зафиксированные показатели в точке 2.1 (слив гидроциклона рудного измельчения) находятся в области присутствия гидроксидов железа (по данным Pt электрода, $pH=10$), что оказывает негативный эффект на флотационный процесс, как было отмечено выше. Аналогичная ситуация отмечается и для точки 3.1 (агитационный чан перед основной флотацией).

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о необходимости изменения точки подачи реагентов и корректировки их расхода по предложенному уравнению (3):

$$\Delta=(Eh(s_1)-Eh(s_2)-a)/k_{s1}-k_{s2}, \text{ г/т} \quad (3)$$

где: $Eh(s_1)$ – значение потенциала 1 электрода из выбранной диагностической модели (мВ); $Eh(s_2)$ – значение потенциала 2 электрода из выбранной диагностической модели (мВ); a –

константа из выбранного уравнения диагностической модели; k_{s1} – коэффициент изменения 1 электродной функции при подаче реагента (мВ·г/т); k_{s2} – коэффициент изменения 2 электродной функции при подаче реагента (мВ·г/т).

Исходя из проанализированных данных видно, что для достижения условий, при которых гидроксокомплексы железа не будут связывать большую часть ионов собирателя необходимо точку подачи сернистого натрия перенести в контактный чан (точка 3.1) с корректировкой расхода Na_2S по уравнению (3). Для сернистого натрия, на данном объекте оно имеет вид(4):

$$\Delta_{\text{Na}_2\text{S}} = (208 - \text{Eh}(\text{Pt}) + \text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S})) / 0,6, \text{ г/т} \quad (4)$$

Результаты корректировки отображены на рисунке 7. Как видно из представленной гистограммы значения ΔpS не превышают 10 (оранжевые столбцы), что является условием достаточности дозировки реагента согласно модели (2).

Также на диаграммы зависимости между потенциалами аргентитового и платинового электродов (рисунок 5) нанесена модель достаточной концентрации ксантогената (5) для обеспечения полной флотации минералов, начиная с основной операции.

$$\text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S}) = \text{Eh}(\text{Pt}) - 240 \quad (5)$$

Данная модель получена аналогично модели (1) при снятии показаний электродов в чистых растворах ксантогената.

Условие достаточности дозировки собирателя (ксантогената), по фронту основной флотации медных минералов может определяться(6):

$$\Delta_{pX} = \text{Eh}(\text{Ag}_2\text{S})_{\text{факт}} - (-240 + \text{Eh}(\text{Pt})_{\text{факт}}) > 10 \quad (6)$$

где Δ_{pX} – разница между фактическими и расчётными (по модели 4) показаниями Ag_2S электрода.

Для достижения необходимой концентрации ксантогената в операции основной флотации и операциях пересчитки необходимо: собиратель подавать, начиная с 1-ой

флотационной камеры основной флотации (точка 4.1) и скорректировать расход собирателя в операциях перераспределительной флотации (рисунок 8). Дозировку собирателя согласно (3) предлагается осуществлять по зависимости(7):

$$\Delta_{\text{вых}} = (240 - E_h(\text{Pt}) + E_h(\text{Ag}_2\text{S}))/2, \text{ г/т} \quad (7)$$

Исходя из проанализированных данных была применена технология изменения дозровок флотационных реагентов во флотационный цикл обогащения. Расход сернистого натрия корректировался исходя из контроля потенциала Ag_2S на уровне -450 мВ. Количественно он добавлялся в соответствии уравнением 4. Также дозировка собирателя корректировалась за счёт предложенной модели оценки достаточной дозировки собирателя (7).

Принятые меры по устранению выявленных негативных факторов привели к улучшению технологических показателей, а именно: извлечение меди в готовый концентрат в среднем увеличилось на 2-2,5%. Также было зафиксировано увеличение выхода концентрата в среднем на 0,3-0,5%. Марка выпускаемого концентрата не изменилась.

Исходя из расчёта рентабельности предполагаемых технологических решений индекс доходности составляет 2,31, срок окупаемости предполагаемых вложений 1,7 года. Анализ чувствительности индекса доходности от цены 1 т концентрата и изменениям его выхода показывает прибыльность предлагаемых внедрений в широком диапазоне колебаний параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается решение актуальной научной задачи по повышению эффективности флотационного обогащения комплексных медных руд путём направленного управления процессом дозировки флотореагентов на основании данных ионоселективных сенсоров.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведён анализ зарубежных и отечественных принципов автоматического контроля циклов флотационного обогащения. На основе методов нейросетвого моделирования предложены контуры оптимизации флотационного процесса. Показано, что оптимизация реагентного режима по ионным моделям занимает обособленное положение в общей структуре управления флотационным процессом.

2. При проведении исследований на обогатимости методами прямой потенциометрии достигнуты наилучшие технологические показатели. Удалось снизить расход реагента Na_2S по сравнению с классической постановкой опытов на подбор расхода реагента на 30 %. Также удалось стабилизировать количество в пульпе гидрокомплексов железа, что обеспечило нейтрализацию негативно влияющих ионов и привело к улучшению технологических показателей обогащения.

3. Разработана адаптивная схема управления реагентным режимом, включающий в себя два контура управления: контур технологического аудита и контур управления реагентным режимом. Разработаны модели управления дозировкой собирателя и сернистого натрия.

4. В ходе применения данной схемы удалось изменить реагентный режим, а именно: точка подачи сернистого натрия перенесена в агитационный чан; точка подачи собирателя, перенесена в 1-ую флотационную камеру основной флотации. Количественно расход реагентов корректировался согласно разработанным моделям.

5. Принятые меры по устранению выявленных негативных факторов привели к улучшению технологических показателей, а именно: извлечение меди в готовый концентрат в среднем увеличилось на 2-2,5%. Также было зафиксировано увеличение выхода концентрата в среднем на 0,3-0,5%. Марка выпускаемого концентрата остаётся неизменной. Исходя из расчёта рентабельности предполагаемых технологических решений индекс доходности составляет 2,31, срок окупаемости предполагаемых вложений 1,7 года.

Дальнейшим этапом развития данной тематики может служить применение разработанной функциональной схемы управления процессом флотации для других типов минерального сырья.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Яковлева, Т.А.** Повышение эффективности флотационного обогащения комплексных медных руд с использованием методов прямой потенциометрии // Т.А. Яковлева, А.О. Ромашев, Г.Н. Машевский // Горные науки и технологии. – 2024. - №3. – С. 92-100 DOI: 10.17073/2500-0632-202308-145.

2. **Яковлева, Т.А.** Разработка методического подхода и способов регулирования процесса флотации порфириновых медно-молибденовых руд /Т.А. Яковлева, А.О. Ромашев, Г.Н. Машевский // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 4. – С. 92-100. DOI: 10.17513/use.38254.

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

3. **Яковлева, Т.А.** Цифровая технология оптимизации дозирования сернистого натрия при флотации медной руды / Яковлева, Т.А., Машевский, Г.Н., Ушаков, Е.К. // Обогащение руд. — 2021. — № 3. — С. 18–33. DOI: 10.17580/or.2021.03.04.

4. **Яковлева, Т.А.** Оптимизация дозирования флотационных реагентов при флотации руд цветных металлов с применением цифровых технологий / Яковлева, Т.А., Ромашев, А.О., Машевский, Г.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6-2. – С 175-188. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_175.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023680109 Российская Федерация. Программа для выбора ионоселективных сенсоров на основе данных калибровки: № 2023668877; заявл. 14.09.2023; опубл. 26.09.2023 / А.О. Ромашев, **Т.А. Яковлева**, Б.Л. Гатиатуллин; заявитель «Санкт-Петербургский горный университет».

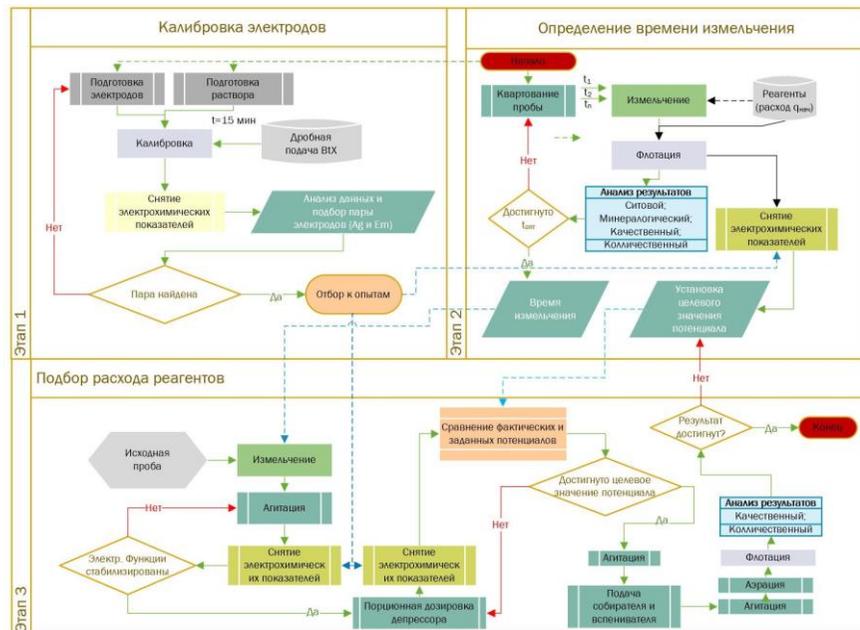


Рисунок 1 - Блок-схема проведения флотационных исследований с ионоселективными сенсорами

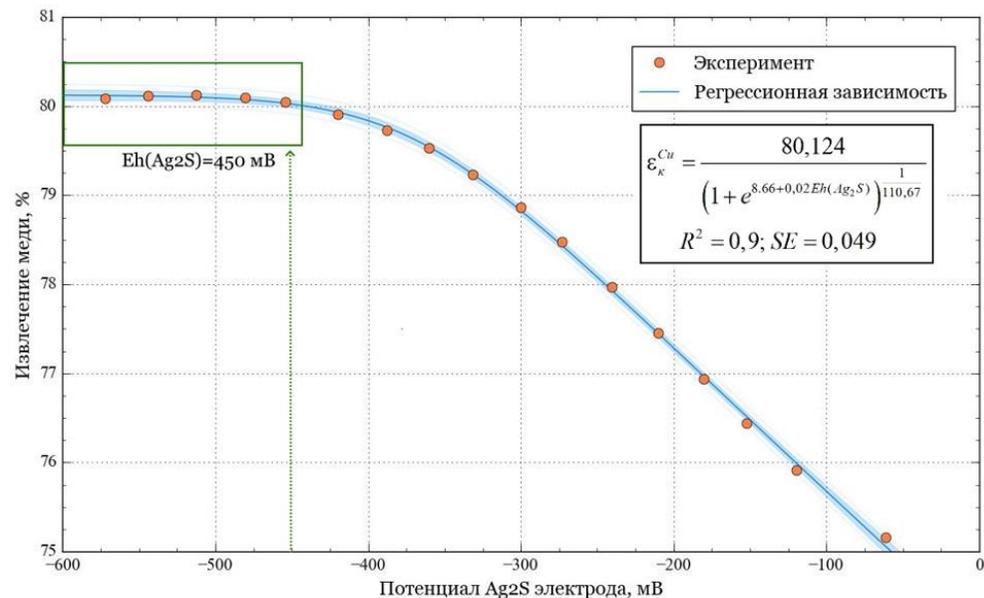


Рисунок 2 - Функция межпараметрической связи извлечения меди и значения потенциала Ag₂S электрода

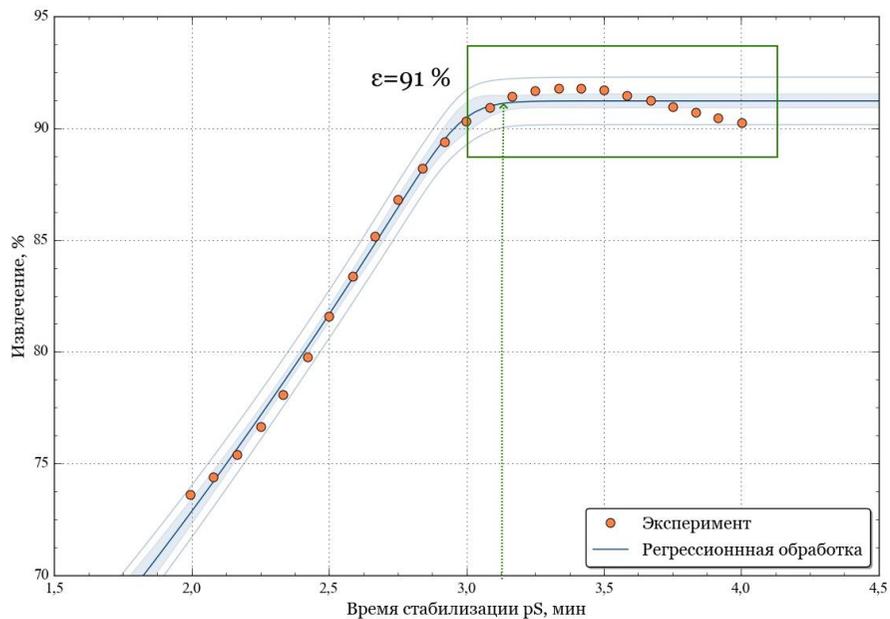


Рисунок 3 - Функция межпараметрической связи извлечения меди и времени стабилизации значения потенциала Ag_2S электрода

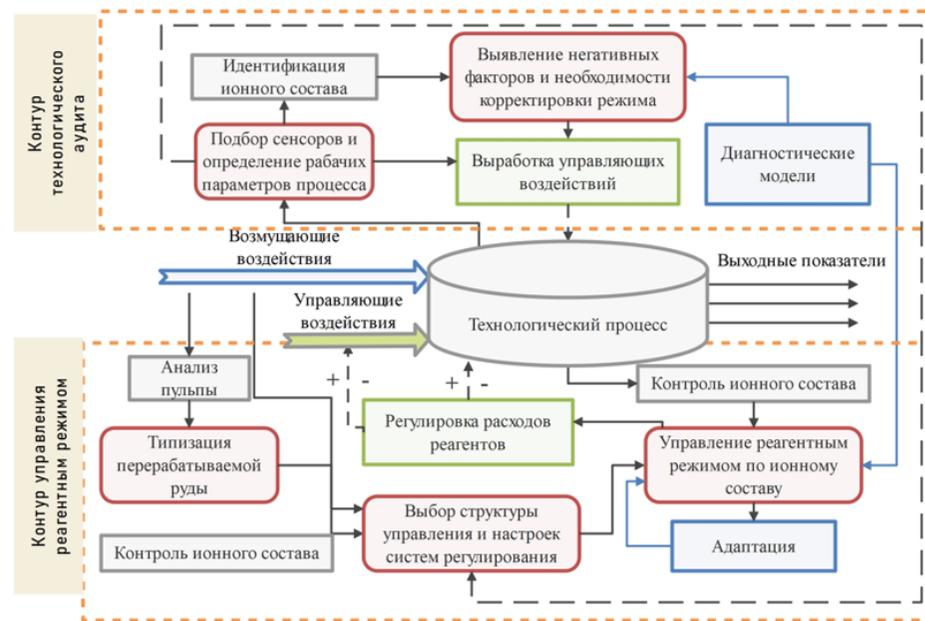


Рисунок 4 – Функциональная схема управления процессом флотации

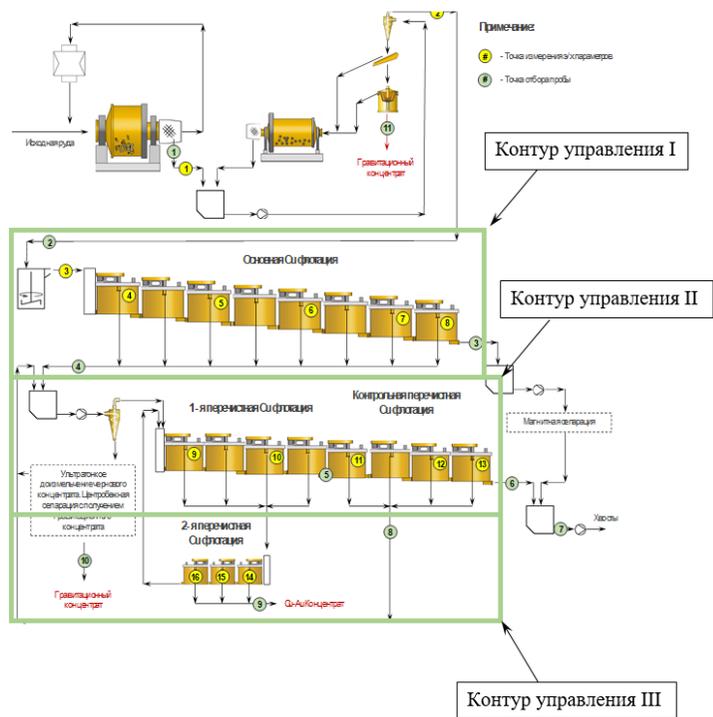


Рисунок 5 - Карта точек измерений электрохимических параметров

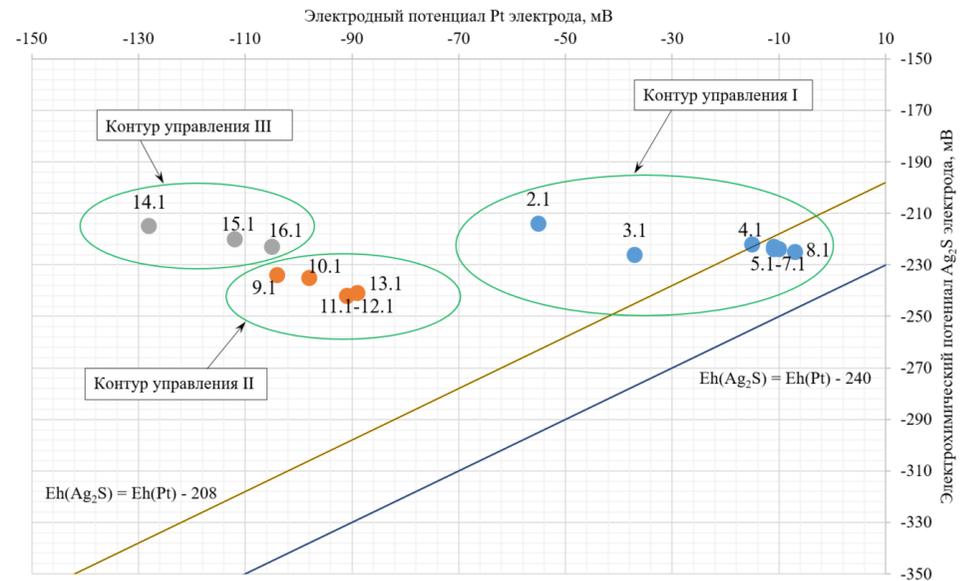


Рисунок 6 - Диаграммы диагностики присутствия гидроксокомплексов железа $Fe(OH)^+$ и достаточной дозировки собирателя по фронту флотации

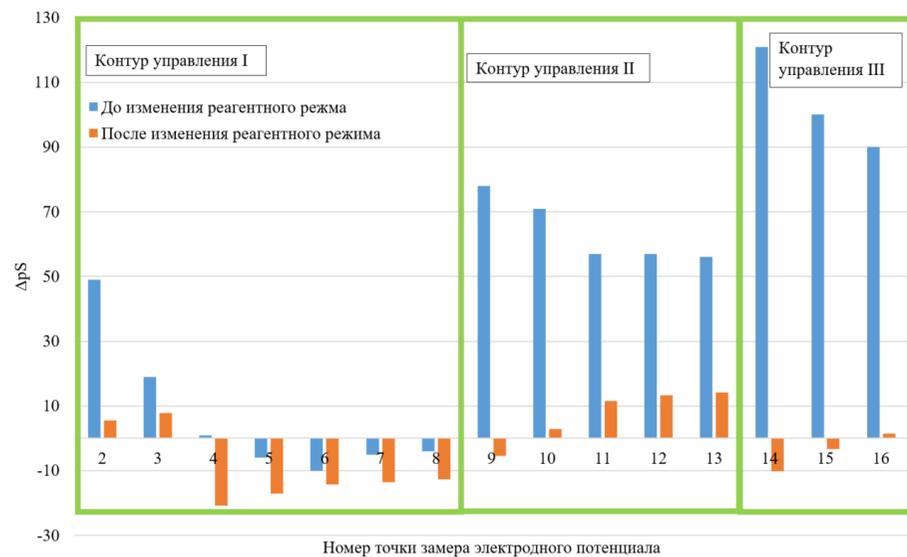


Рисунок 7 – Диаграмма изменения значений ΔpS до и после принятых мер по устранению негативных факторов

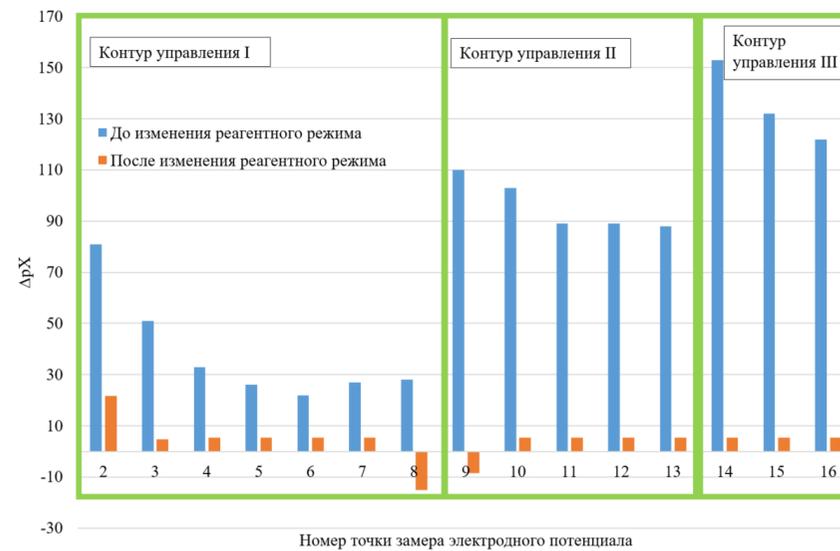


Рисунок 8 – Диаграмма изменения значений ΔpX до и после принятых мер по устранению негативных факторов