

О Т З Ы В

официального оппонента, *д.т.н., доцента Горловой Ольги Евгеньевны* на диссертацию *Яковлевой Татьяны Александровны* на тему: «Повышение эффективности обогащения комплексных медных руд на основе данных ионоселективных сенсоров», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

1. Актуальность темы диссертации

Эффективная переработка комплексных медьсодержащих руд флотационным методом всегда связана с необходимостью осуществления точного контроля всех параметров процесса. На горно-обогатительных комбинатах для этой цели используется широкий спектр датчиков, осуществляющих оценку состояния флотационного процесса. Тем не менее, несмотря на развитие технологий, время задержки между снятием данных и их получением оператором остаётся на неудовлетворительном уровне, что, в конечном итоге, приводит к потерям ценного компонента и выходу технологической цепочки из оптимального режима. В последние годы отмечается рост исследований для решения данной проблемы с использованием комплексов контроля на основе методов машинного обучения и искусственного интеллекта. Внедрение таких алгоритмов позволяет не только повысить скорость обработки сигналов, но и выявить скрытые закономерности в процессе флотации, которые ранее были недоступны при применении традиционных методов исследований.

Автоматическое регулирование процесса флотации, в котором оперативность управления системой дозирования и подачи флотационных реагентов для обеспечения селективности разделение минералов играет большую роль, является важным средством оптимизации производственных процессов и повышения показателей флотационного обогащения. Современные системы автоматического регулирования по ионному составу жидкой фазы пульпы способны проводить детальный анализ электрохимических параметров пульпы, что критически важно для глубокого понимания процессов, происходящий во флотационном обогащении, обеспечивают высокую точность измерений, позволяют отслеживать изменения в составе руды в реальном времени. Предложению и обоснованию новых решений по повышению эффективности контроля и целенаправленного управления процессом флотации комплексных медных руд на основании данных ионоселективных сенсоров и посвящена кандидатская диссертация Яковлевой Татьяны Александровны.

Кроме того, такие современные методы как машинное обучение, нейросетовое моделирование представляют собой привлекательные инструменты для совершенствования автоматического управления флотационным процессом, поскольку позволяют выявлять сложные зависимости в данных, учитывать множество переменных одновременно, способны справляться с неполными, шумными и коррелированными данными, следовательно, позволяет более точно предсказывать поведение сложных флотационных систем.

Всем этим актуальным теоретическим и практическим вопросам флотационного обогащения комплексных руд и посвящена диссертационная работа соискателя.

Актуальность выполнения данного диссертационного исследования продиктована существующей потребностью повышения селективности и эффективности флотационного обогащения комплексных медных руд, необходимостью совершенствования методов ионометрии для оценки электрохимического состава пульпы, необходимостью развития и

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-536 от 12.12.24
АУ УС

практического применения современных методов нейросетевого моделирования сложных флотационных процессов.

2. Научная новизна диссертации

Научную новизну диссертационного исследования Т. А. Яковлевой составляют экспериментально установленные диагностические модели отклика значений потенциалов ионоселективных сенсоров на концентрацию реагентов в пульпе, на основе которых может производиться дозировка реагентов в условиях обогатительной фабрики, и разработанная методика исследований руд на обогатимость флотационным методом, позволяющая повысить селективность обогащения.

Предложенная методика, основанная на построении цифровой модели процесса по данным электрохимических измерений непосредственно в пульпе и нейросетевом моделировании объекта с помощью обобщенно-регрессионной нейронной сети, позволяет более точно смоделировать процесс флотации без постановки дополнительных опытов и подобрать оптимальные параметры.

Установленные нейросетевым моделированием функции межпараметрической связи между извлечением меди и значением потенциала Ag_2S электрода и временем его стабилизации позволяют вести флотационный процесс с распределенной дозировкой и временем агитации модификатора Na_2S и получать более высокие показатели флотации по сравнению с трёхфакторным D-оптимальным экспериментом.

Разработанный комплекс алгоритмов и технических средств функциональной схемы управления процессом флотации по ионным моделям, состоящей из контура технологического аудита и контура управления реагентным режимом, позволяет не только контролировать процесс, но и осуществлять управление реагентным режимом по ионному составу при колебаниях качества поступающей руды.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений и результатов подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью, оценкой полученных данных методами математической статистики. Натурные эксперименты проводились с применением современного поверенного оборудования и средств измерений. Использован комплекс современных методов исследования исходной руды, особенностей измельчения и флотационного обогащения. Электрохимические исследования проведены с применением мультиканальной системы электрохимического контроля EMF-16, которая позволила сформировать достаточное информационное пространство для проведения анализа. Для оценки, обработки, анализа результатов лабораторных исследований, данных о работе обогатительного производства и формирования математических моделей применены методы углублённой статистики, нейросетевого моделирования с использованием программного пакета Statistica и программного модуля Neural Network (Statsoft).

Работа была апробирована на российских и международных семинарах и конференциях в частности: 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.

4. Соответствие содержания диссертации указанной специальности

Тема диссертации, направленность проведённых исследований и полученных результатов соответствуют паспорту научной специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых по пунктам:

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 минерального сырья;

7. Моделирование, контроль, цифровизация, автоматизация технологических процессов обогащения, их оптимизация.

5. Научные результаты, их ценность

Основную научную ценность работы составляет совокупность установленных в ходе экспериментально-теоретических исследований зависимостей изменения показателей флотации рудного сырья от значений электрохимических потенциалов флотационной пульпы и применение к полученному массиву данных методик углубленной статистики и нейросетевого моделирования, что позволяет устанавливать механизмы протекающих в пульпе процессов и обосновывать новые решения по совершенствованию технологического режима флотации комплексных медных руд.

Научную ценность работы составляет теоретическое обоснование и разработка способа флотации комплексных медных руд с дозировкой сернистого натрия на основе использования данных ионоселективных сенсоров с учетом установленного диапазона значений потенциала Ag_2S электрода, что позволяет снизить потери металлов с хвостами и повысить эффективность процесса флотационного обогащения.

Не менее ценным результатом является разработанная адаптивная система управления дозировкой флотационных реагентов в условиях изменчивости состава перерабатываемого сырья на основе данных ионоселективных сенсоров и согласно разработанным моделям, внедрение которой позволит стабилизировать качество получаемых концентратов и повысить технологические показатели.

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 учёной степени кандидата наук в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

6. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

К наиболее значимым теоретическим и практическим результатам работы, на наш взгляд, относятся следующие.

Разработана, теоретически обоснована и экспериментальная верифицирована методика и блок-схема проведения исследований на обогатимость с учетом электрохимических параметров пульпы и с применением современных методов численного моделирования, которая по сравнению с классическим трёхфакторным D-оптимальным экспериментом позволила за счет точечной дозировки реагента Na_2S по показаниям аргентитового электрода получить более

высокие технологические показатели. Содержание меди в черновом концентрате повысилось с 6,94 до 8,85%, извлечение меди – с 73,32 до 90,70%, расход реагента Na_2S снижен на 30 %.

Применение данной методики дало более глубокое понимание протекающих во флотационной камере процессов, позволило оценить негативное влияние гидроксокомплексов железа $\text{Fe}(\text{OH})^+$ на извлечение ценных компонентов, и разработать приемы снижения этого влияния, в частности проводить дозирование реагентов с учетом найденных целевых значений потенциала Ag_2S электрода и времени стабилизации потенциала.

Предложен и успешно апробирован способ, позволяющий определять расходы флотореагентов на основе данных электрохимических потенциалов ионоселективных сенсоров для достижения целевых технологических показателей обогащения.

Гармоническим анализом сменных экспресс-данных разложением случайных функций исследуемых параметров в ряды Фурье установлены корреляционные связи между анализируемыми параметрами и уточнено влияние минералого-технологической структуры объекта на дисперсии технологических показателей. Отражено проявление фактора зоны вторичного обогащения и его взаимосвязь с технологическими показателями.

При оценке чувствительности извлечения меди к вариации входных параметров было показано, что применение нейросетевых моделей при исследовании многофакторных и нелинейных процессов, таких как флотация, при недостаточной информативности данных, тем не менее, позволяет устанавливать влияния основных исследуемых параметров на целевые функции, а, значит, корректировать входные параметры.

Оценка вариабельности объекта по извлечению меди, осуществленная с помощью нейросетевой методологии и линейной аппроксимация полученной сложной функциональной зависимости, показала влияние вариации содержания меди в исходной руде на ее извлечение. Установленная существенная разница в приросте извлечения меди при изменении содержания меди в перерабатываемой шихте на первой и второй нитках была объяснена нарушениями технологических режимов на первой нитке и недостаточной информативностью данных для построения нейросетевых моделей.

Получены диаграммы диагностики присутствия в жидкой фазе пульпы гидроксокомплексов железа $\text{Fe}(\text{OH})^+$ по электрохимической модели зависимости между потенциалами аргентитового и платинового электродов, что позволило сделать важные выводы о возможном комплексовании собирателя присутствующими гидроксокомплексами железа и о необходимости переноса точек подачи сернистого натрия и корректировки его расхода.

Предложена формула расчета дозировки реагентов по показаниям ионоселективных сенсоров.

Получены диаграммы зависимости между потенциалами аргентитового и платинового электродов с нанесенной теоретической моделью достаточной концентрации ксантогената, что позволило сделать важные выводы о точках подачи собирателя и корректировке его расхода в операциях перечистой флотации.

При реализации изменений дозровок и точек подачи флотационных реагентов во флотационный цикл обогащения в соответствии с установленными моделями, когда расход сернистого натрия корректировался исходя из контроля потенциала Ag_2S на уровне -450 мВ, а дозировка собирателя проводилась по предложенной модели оценки достаточной дозировки собирателя, удалось приблизить значения потенциалов ионоселективных сенсоров к диагностическим моделям и, тем самым устранить влияние выявленных негативных факторов. При этом улучшились технологические показатели флотации комплексной медной руды:

извлечение меди в готовый концентрат увеличилось с 88,4 до 90,6%, выход медного концентрата – с 2,8 до 3,0%, марка выпускаемого концентрата не изменилась.

Методики углубленной статистики, нейросетевого моделирования показали свою применимость как при анализе результатов лабораторных исследований процесса флотации, так и при анализе данных работы обогатительного производства. Они позволяют получать достаточно точные регрессионные модели при меньшем количестве исследований, при недостаточной информативности данных, способны выявлять сложные скрытые зависимости в массивах данных, учитывать одновременно несколько переменных факторов и более глубоко интерпретировать полученные результаты.

Таким образом, теоретическая значимость диссертации, на наш взгляд, состоит в том, что полученные новые научные результаты расширяют и углубляют знания о протекающих во флотационной пульпе сложных физико-химических процессах, механизмах этих процессов, и представляют ценность для дальнейшего развития флотационного обогащения медьсодержащих руд путем целенаправленного управления электрохимическим составом пульпы.

Практическую ценность представляет предложенный способ управления дозировкой флотореагентов в условиях обогатительной фабрики на основе данных ионоселективных сенсоров, позволяющий стабилизировать качество получаемого концентрата, а также 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 определять состав набора ионоселективных сенсоров для проведения электрохимических исследований.

Результаты выполненных исследований использованы в учебном процессе факультета переработки минерального сырья «Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II» для студентов специальности «Обогащение полезных ископаемых» при проведении занятий по дисциплинам «Флотационные методы обогащения», «Технология переработки руд цветных металлов», а также в деятельности ООО «Новомэк Инжиниринг» (акт о внедрении результатов кандидатской диссертации от 30 сентября 2024 года) при проведении научно-исследовательских работ.

7. Замечания и вопросы по работе

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В качестве общего замечания следует отметить, что выводы по главам не отражают всего содержания этих глав, а общее заключение – всех результатов работы. Тем самым не подчеркивается оригинальность проведенных исследований, новизна и ценность полученных автором теоретических и практических результатов, хотя всё это в диссертации имеется.

2. При выполнении факторного анализа проблематичным является вопрос выбора количества компонент для описания рассматриваемого факторного пространства. Каким образом в представленной работе решался этот вопрос?

3. На функциональной схеме управления процессом флотации по ионным моделям (рис. 4.26) нет «входа» в блок Диагностические модели, только «выходы». Требуется пояснение, с чем связан этот блок. На этой же блок-схеме в контуре Контроль управления реагентным режимом не понятно, что за стрелка идет параллельно блоку Анализ пульпы, откуда она идет и куда?

4. Может ли быть применена предложенная методика по определению диагностических моделей к другим реагентным режимам, отличным от рассматриваемого в диссертационной работе, к другим типам медных руд?

5. В п. 4.7 сказано, что отклонение от зависимости (4.8) определяется уравнением (4.9), где ΔpS – разница между фактическими и расчетными показаниями Ag_2S электрода >10 мВ. На стр. 104 говорится... Как видно из представленной гистограммы (рисунок 4.30), значения ΔpS не превышают 10 (оранжевые столбцы), что является условием достаточности дозировки реагента согласно модели (4.9). Но в точках 11, 12, 13 значения $\Delta pS >10$ мВ. Значения ΔpS должны быть больше или меньше 10 мВ? Аналогично, по условию достаточности дозировки собирателя (ксантогената) по фронту основной флотации медных минералов $\Delta pX >10$ мВ (выражение 4.18). На рис. 4.33 только в точке 2 значение $\Delta pX >10$ мВ, в остальных точках – меньше 10 мВ. Как интерпретировать эти данные?

6. Чем всё-таки автор объясняет разницу в технологических показателях по 1 и 2 линиям на обогатительной фабрике, которые легли в основу статистической обработки и моделирования, и, соответственно, дали существенно отличающиеся модели для 1 и 2 линий? При том, что руда, вероятнее всего, поступает с одного усреднительного склада крупнодробленой руды. Насколько это критично для моделирования и последующего управления процессом по цифровым моделям?

7. При анализе временных трендов изменения извлечения меди в концентрат (рис. 4.7) и изменения содержания меди в одноименный концентрат (рис. 4.8) на первой нитке за узкий интервал времени автор только констатирует, что наблюдаемые реальные кривые хорошо описывается косинусоидами. Как может быть объяснен этот факт и такие выраженные периоды косинусоид $T=3$ смены и $T=4,3$ смены соответственно?

Есть некоторые неточности по тексту диссертации. На стр. 76 сказано, что... В области частоты $\lambda=0,025$ 1/см (рис. 4.12) наблюдаются вторые гармоники с высокой спектральной плотностью при разложении случайных функций $\alpha Au=f(\tau)$ и $\alpha Ag=f(\tau)$ в ряды Фурье, при этом, не наблюдается взаимосвязь с технологическими показателями. В то же время на графиках 4.12 представлены «Результаты разложения случайных функций $\alpha Cu = f(\tau)$, $\beta Cu = f(\tau)$ в ряды Фурье». В названии должно быть еще $\epsilon Cu=f(\tau)$. Далее по тексту... В этой области частот наблюдается повышенная спектральная плотность при разложении случайной функции $\beta Cu=f(\tau)$ (рисунок 4.13 и 4.14). А должна быть ссылка на рис. 4.11, 4.12.

На стр. 90...Как видно из таблицы 4.15, на извлечение меди оказывают наибольшее влияние дисперсия содержания меди. А должно быть – табл. 4.14.

Не расшифровано, что такое Mt в табл. 4.1.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации соискателя Яковлевой Татьяны Александровны. Автор, результативно используя уже известные зависимости, методики, программные продукты, адаптировал их к решению задач данного диссертационного исследования и получил некоторые новые научные и практические результаты.

Диссертация обладает научной новизной, практической значимостью, соответствует паспорту научной специальности и является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной научной задачи повышения эффективности флотационного обогащения комплексных медных руд, имеющей и важное практическое значение.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Повышение эффективности обогащения комплексных медных руд на основе данных ионоселективных сенсоров», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении учёных степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утверждённого приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета от 20.05.2021 № 953 адм., а ее автор – Яковлева Татьяна Александровна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Официальный оппонент

д.т.н. по специальности 2.8.9 Обогащение полезных ископаемых,
доцент, профессор кафедры геологии,
маркшейдерского дела и обогащения
полезных ископаемых ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Горлова Ольга Евгеньевна

28 ноября 2024 года

Сведения об официальном оппоненте:

Горлова Ольга Евгеньевна

Доктор технических наук, доцент

Профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, проспект Ленина, д. 38.

+7 (3519) 29-85-55,

gorlova_o_e@mail.ru

Подпись Горловой Ольги Евгеньевны заверяю

