

*На правах рукописи*



**АРАБАДЖИ Яна Николаевна**

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СНИЖЕНИЯ  
ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В ЦИНКОВОМ КОНЦЕНТРАТЕ ПРИ  
ФЛОТАЦИИ ТОНКОВКРАПЛЕННЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

**Научный руководитель:** **Орехова Наталья Николаевна,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова» (г. Магнитогорск)

**Официальные оппоненты:** **Игнаткина Владислава Анатольевна,**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС» (г. Москва)

**Кузнецов Валентин Вадимович,**  
кандидат технических наук, ассистент кафедры обогащения полезных ископаемых, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург)

**Ведущая организация:** ФГБУН «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Новосибирск)

Защита состоится «18» июня 2026 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 на базе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <https://www.istu.edu/deyatelnost/nauka/dissertatsii>

Автореферат разослан «30» апреля 2026 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

E-mail: [vulix2011@yandex.ru](mailto:vulix2011@yandex.ru) Тел./факс: (3952) 40-51-17

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент

Н. В. Вулых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

По востребованности цветных металлов в мире цинк уступает только алюминию и меди, при этом современный металлургический передел по переработке цинковых концентратов предъявляет все более высокие требования к их качеству, в том числе в части содержания диоксида кремния.

Истощение минерально-сырьевой базы и снижение содержания ценных компонентов отражается на ежегодном увеличении доли тонковкрапленных и бедных труднообогатимых цинксодержащих сульфидных руд в текущей переработке, ввиду чего технологии получения цинкового концентрата, соответствующего требованиям кондиций, многократно усложнились.

Непрерывное развитие технологий переработки таких руд требует, в том числе, более тонкого помола для раскрытия цинксодержащих сульфидов, что неизбежно приводит к увеличению доли частиц шламовой крупности в питании флотации.

Преимущественно со шламовыми частицами кремнийсодержащих минералов вмещающей породы связано загрязнение цинкового концентрата диоксидом кремния, которое происходит в результате флотации гидрофобных минералов, содержащих диоксид кремния, механического выноса частиц шламовой крупности в пенный слой и перехода тонких частиц нерудных минералов в концентрат за счет их неселективного налипания на частицы сфалерита флотационной крупности.

Для повышения эффективности отделения цинковых минералов от нерудных компонентов авторами научных трудов – Абрамовым А. А., Чантурией В. А., Бочаровым В. А., Глембоцким В. А., Классеном В. И., Игнаткиной В. А. и др. – разработаны различные рациональные технологические схемы, а также изучены многообразные способы и методы, используемые для изменения свойств флотационной пульпы. Тем не менее, снижение содержания диоксида кремния ниже 3 % при содержании кремнезема в исходной руде на уровне 35-40 % и тонком срастании сфалерита с вмещающей породой является трудной задачей, решение которой известными способами затруднительно и малоэффективно.

В связи с чем поиск способов обескремнивания цинкового концентрата ниже кондиций является актуальной задачей для отрасли и ресурсосбережения государства.

**Целью работы** является разработка технологических решений для снижения содержания  $\text{SiO}_2$  в цинковом концентрате за счет селективной депрессии кремнийсодержащих минералов новым органическим депрессором и минимизации их механического выноса.

Для достижения цели диссертационного исследования были поставлены и решены следующие **задачи**:

- изучить минералогические особенности сульфидных руд, склонных к шламообразованию, и физико-механические свойства рудных и нерудных минералов, входящих в их состав;

- разработать методику оценки склонности руды к ошламование и критерий прогнозирования данного свойства на стадии проведения минералогического анализа руды;
- теоретически изучить и экспериментально проработать возможные способы снижения извлечения нерудных минералов в цинковый концентрат;
- установить влияние режимных параметров флотации на механический вынос компонентов нерудных минералов и на основе моделирования флотационного процесса оценить вклад каждого управляемого параметра отдельно и в совокупности в снижение эффекта механического выноса;
- установить механизм действия эффективного органического депрессора кремнийсодержащих минералов вмещающих пород;
- апробировать разработанную комплексную технологию снижения загрязнения цинкового концентрата кремнийсодержащими минералами и определить экономическую эффективность их применения.

**Объектом исследования** являлась полиметаллическая руда Корбалихинского месторождения, характеризующаяся эмульсионной вкрапленностью, сверхтонким срастанием минералов ценных компонентов с вмещающими породами и наличием волокнистых и пластинчатых кремнийсодержащих нерудных минералов. Кремнийсодержащие нерудные минералы представлены кварцем (30-40 %), клинохлором (15-17 %) и мусковитом (9-12 %).

**Предметом исследования** являются закономерности флотации и механического выноса кремнийсодержащих минералов в цинковый концентрат.

#### **Научная новизна работы**

1. Впервые установлены и количественно описаны зависимости между удельным количеством органического депрессора RD-1033 во флотационной системе, изменением электрохимических характеристик поверхности (дзета-потенциал) и ее гидрофобно-гидрофильными свойствами (краевой угол смачиваемости, флотуруемость) для кремнийсодержащих минералов [кварц, мусковит, клинохлор] и сфалерита.

2. Селективная депрессия кварца, мусковита и клинохлора высокомолекулярным депрессором RD-1033 обусловлена образованием на их поверхности гидрофильных супрамолекулярных комплексов, способных к полимеризации, состоящих из поликремниевого скелета, закрепленного на поверхности минералов через водородные связи (подтверждено ИК-спектрами), и формирующих гидратный слой карбоксильными и гидроксильными группами, что способствует гидрофилизации поверхности и вызывает агрегацию частиц, предотвращая их механический вынос в пену со сфалеритом.

3. Установлены закономерности влияния регулируемых режимных параметров (плотность пульпы, расход воздуха, скорость вращения импеллера) на механический вынос нерудных минералов с целью повышения качества цинкового концентрата при флотации полиметаллической руды.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Внедрен новый реагентный режим на основе разработанного селективного депрессора RD-1033 минералов: кварц, клинохлор, мусковит. Механизм действия реагента основан на формировании супрамолекулярных гидрофильных комплексов, что позволяет целенаправленно снижать флотуруемость кремнийсодержащих частиц. Разработанный технологический подход оформлен в качестве изобретения «Способ флотации сульфидных цинксодержащих руд цветных металлов» (подана заявка на патент № 2025110459 от 23.04.2025).

С использованием активного эксперимента получена математическая модель, описывающая зависимость коэффициента механического выноса от ключевых режимных параметров (плотность пульпы, расход воздуха, скорость импеллера). Модель служит основой для предиктивного управления и оптимизации селективности флотации с целью минимизации загрязнения концентрата ультратонкими шламами.

Разработан предиктивный критерий  $K_{ш}$  оценки склонности тонковкрапленных полиметаллических сульфидных руд к шламообразованию на основе минералогического состава. Для тонковкрапленных полиметаллических руд установлены граничные значения критерия  $K_{ш}$  ( $\leq 0,57$  и  $\geq 1,1$ ), позволяющие на стадии изучения руды прогнозировать формирование пульпы с повышенным ( $>40\%$ ) содержанием класса  $-20$  мкм и, как следствие, риск снижения селективности флотации. Методика даёт основу для предиктивного выбора и оптимизации технологических решений, направленных на снижение механического выноса.

Обоснованные решения по оптимизации режимных параметров цинк-пиритного цикла флотации внедрены в действующее производство по получению цинкового концентрата на Рубцовской обогатительной фабрике. Реализация разработанного комплекса мер управления технологией позволяет снизить извлечение  $SiO_2$  в концентрат на 30-35 % отн.

## **Методология и методы исследований**

В диссертационной работе выполнен анализ и систематизация данных по опыту переработки сульфидных руд; использован комплекс методов исследований: химический, микрорентгеноспектральный, рентгенофазовый, гранулометрический, ИК-спектроскопия; проведены лабораторные (в т.ч. с применением методов планирования экспериментов) и опытно-промышленные испытания; квантово-химическое моделирование и технико-экономические расчеты. Исследования проведены с использованием сертифицированного оборудования по стандартным методикам.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Повышение селективности разделения сфалерита и кварца обеспечивается подачей органического высокомолекулярного депрессора RD-1033 с расходом 200-250 г/т, приводящей к избирательному снижению в два раза краевого угла смачивания и в 2,5 раза абсолютного значения  $\zeta$ -потенциала поверхности кварца, без перезарядки поверхности, что по экспоненциальной зависимости снижает константу скорости его флотации (в 1,2 раза) и вызывает агрегацию ультратонких шламов.

2. Адсорбция высокомолекулярного депрессора RD-1033, содержащего сополимеры акриловых и карбоновых кислот, на поверхности кремнийсодержащих минералов с формированием супрамолекулярных структур повышает гидрофилизацию поверхности и приводит к агрегации частиц вследствие приближения дзета-потенциала минеральной поверхности к нулю и способности реагента к полимеризации, что обеспечивает эффективное отделение породных минералов от сфалерита и снижает их механический вынос в пенный слой.

3. Синергетический эффект обескремнивания цинкового концентрата (не менее чем на 32 % отн.) достигается комбинированным применением нового высокомолекулярного депрессора RD-1033 (расход 200-250 г/т) с результатами разработанной математической модели по регулированию механического выноса силикатов путем оптимизации содержания твердого, скорости вращения импеллера и расхода воздуха при флотации и превышает аддитивный эффект от раздельного применения данных способов обескремнивания (1,96 % абс.).

**Обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов** диссертационной работы подтверждаются использованием широкого спектра методов химических, физических и физико-химических исследований процесса флотации и минерального вещества, обширным объемом полученных экспериментальных данных. Разработанный комплекс эффективных способов снижения содержания диоксида кремния в цинковом концентрате апробирован в условиях Рубцовской ОФ АО «Сибирь-Полиметаллы», что подтверждается актами опытно-промышленных испытаний.

#### **Апробация результатов работы**

Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: на международном совещании «Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов» (Плаксинские чтения, г. Апатиты, 2024 г.); на международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2025 г.); на международной конференции Tech Mining Сибирь-2025 (г. Красноярск, 2025 г.); на 83-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2025 г.); на Московском международном конгрессе обогатителей (г. Москва, 2025 г.); на конференции «Современные достижения университетских научных школ» (г. Магнитогорск, 2025г.); на международном совещании «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения, г. Екатеринбург, 2025 г.).

**Публикации.** Результаты проведенных исследований отражены в 9 работах, в том числе 3 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 109 наименований, содержит 154 страниц машинописного текста, 48 рисунков, 34 таблицы, 4 приложения.

**Личное участие автора** заключается в постановке цели и задач исследований, проведении экспериментальных испытаний, оценке закономерностей

процессов и определении механизма действия высокомолекулярного органического депрессора кремнийсодержащих минералов, непосредственном участии в проведении лабораторных и опытно-промышленных испытаний, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке научных публикаций и докладов; самостоятельно написана и оформлена диссертация.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность научному руководителю работы, доктору технических наук, профессору Ореховой Н. Н. за ценные консультации и поддержку на протяжении всей работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дано обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель, идея и задачи работы, основные защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость результатов, полученных в диссертации, приведены сведения об объекте, методах исследования, апробации работы и публикациях автора.

В *первой главе* оценено состояние производства цинкового концентрата, включая требования к качеству, и изучены причины его загрязнения шламами нерудных минералов. Выполнен обзор современных подходов к повышению качества цинковых концентратов.

Во *второй главе* описаны методы исследования объекта, схемы флотационных экспериментов и режимные параметры. Рассмотрены установки и методики изучения физико-химических свойств минералов, включая методы смачивания, ИК-спектроскопии, измерения дзета-потенциала и графического определения констант скорости флотации, а также минералогические исследования для анализа состава проб и продуктов обогащения.

В *третьей главе* описывается зависимость индекса селективности флотационного процесса от количества частиц шламовой крупности и обосновывается возможность оценки склонности рудного сырья к ошламованию. Определена количественная характеристика ошламованности тонковкрапленных полиметаллических сульфидных руд и разработана методика ее определения. Предложен критерий шламуемости руды и определены его граничные значения. Приведены результаты исследований по снижению механического выноса шламов вмещающих пород.

В *четвертой главе* доказывается первое и второе научное положение. Приведены результаты изучения влияния обработки депрессором на физико-химические свойства минералов и их флотируемость. Изучается депрессирующая способность высокомолекулярного органического реагента RD-1033, механизм его действия и его взаимодействие с поверхностью минералов.

В *пятой главе* доказывается третье научное положение, приводятся результаты опытно-промышленных испытаний по внедрению оптимальных режимных параметров и депрессора RD-1033. Представлены результаты испытаний разработанных способов обескремнивания цинкового концентрата и оценки экономической эффективности от их внедрения.

**Первое научное положение: Повышение селективности разделения сфалерита и кварца обеспечивается подачей органического высокомолекулярного депрессора RD-1033 с расходом 200-250 г/т, приводящей к избирательному снижению в два раза краевого угла смачивания и в 2,5 раза абсолютного значения  $\zeta$ -потенциала поверхности кварца, без перезарядки поверхности, что по экспоненциальной зависимости снижает константу скорости его флотации (в 1,2 раза) и вызывает агрегацию ультратонких шламов.**

На основании проведенных исследований установлено, что при обработке поверхности кварца 0,01 % раствором высокомолекулярного депрессора RD-1033 угол смачивания образца ( $\theta$ ) снижается с 56,9 до 29°. При увеличении концентрации до 0,05 %  $\theta = 45,7^\circ$ , что также ниже значения естественной смачиваемости образца. Наименьшему углу контакта сфалерита ( $\theta = 52^\circ$  против естественного –  $67,2^\circ$ ) соответствует концентрация раствора RD-1033 – 0,0125 %. С увеличением концентрации депрессора краевой угол смачивания увеличивается и при концентрации 0,05 % составляет 54 градуса (рисунок 1).

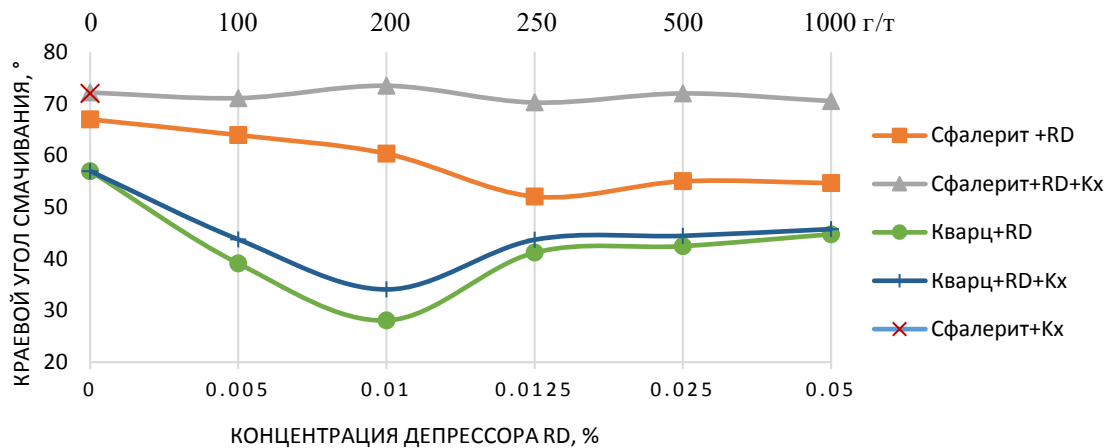


Рисунок 1 – Изменение краевого угла смачивания минеральной поверхности при обработке только раствором депрессора и последовательно депрессором и собирателем

Последовательное применение раствора RD-1033 с переменной концентрацией и раствора БКК с постоянной концентрацией 0,01 % не привело к заметному изменению краевого угла смачиваемости поверхности сфалерита при увеличении концентрации депрессора. Значения варьировались в пределах  $70,3-73,51^\circ$  и оставались близкими к значению для аншлифа сфалерита, обработанного раствором БКК, которое составляло  $72^\circ$ . Это доказывает отсутствие взаимодействия депрессора с поверхностью сульфидов.

Изменения краевого угла смачивания поверхности кварца следовали той же зависимости, что и при обработке без применения собирателя.

Измерения электрокинетического потенциала при значении  $pH=7$  (с расходом депрессора в диапазоне 100-300 г/т) показали, что  $\zeta$ -потенциал сфалерита находится в интервале от -0,20 до -0,21 мВ (рис. 2а). У кремнийсодержащих шламов наблюдался сдвиг  $\zeta$ -потенциала в сторону положительных значений, что, в соответствии с теорией ДЛФО, свидетельствует о преобладании сил притяжения над силами отталкивания и, следовательно, о повышении вероятности агрегации частиц кремнийсодержащих шламов.

В условиях предварительной обработки кремнийсодержащих минералов реагентом RD-1033 с последующим добавлением раствора извести до значения  $pH>12$  (что моделирует условия промышленного технологического процесса), изоэлектрическая точка, наблюдаемая в экспериментах без использования депрессора, отсутствует. Это указывает на экранирование поверхности минералов от адсорбции ионов  $Ca^{2+}$  и сохранение отрицательного заряда поверхности (см. рис. 2б). В то же время, поверхность сфалерита, даже при подаче депрессора, изменяет свой заряд на положительный, что подтверждает отсутствие взаимодействия нового высокомолекулярного депрессора с его поверхностью.

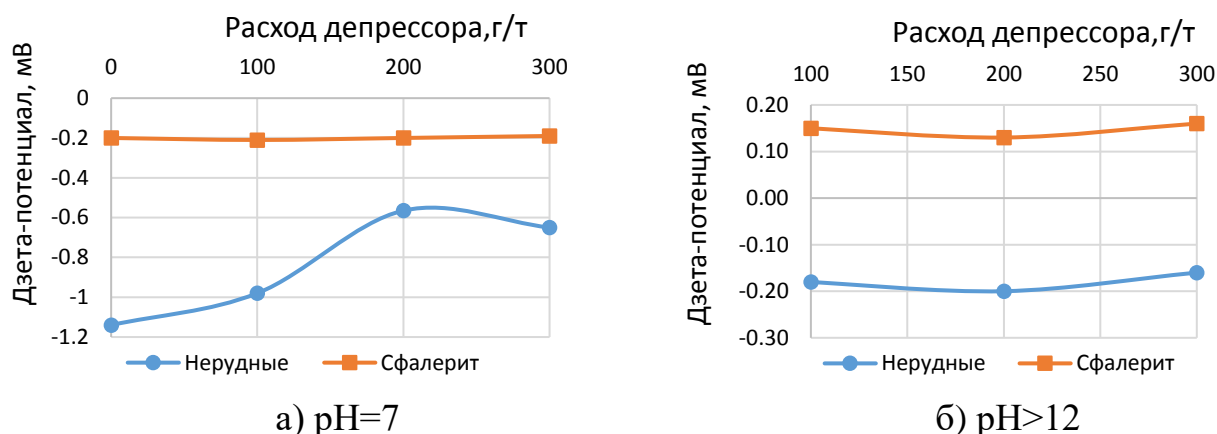


Рисунок 2 – Влияние подачи депрессора на дзета-потенциал шламов в нейтральной (а) и щелочной (б) среде  $Ca(OH)_2$

Сравнение значений электрокинетических потенциалов чистых минералов с сульфидной и породной частями руды (рис. 3) показывает, что в условиях сильнощелочной среды после последовательного введения извести и депрессора ( $CaO + RD 200$  г/т) сфалерит демонстрирует невысокий положительный потенциал. Кремнийсодержащие минералы, напротив, имеют отрицательный потенциал, который значительно меньше, чем в слабощелочной среде и при отсутствии депрессора в системе. Это снижает флотуруемость частиц породы и бедных сростков сфалерита с вмещающей породой анионным собирателем по электростатическому механизму и повышает вероятность агрегации кремнийсодержащих шламов, о чём свидетельствует потенциал породной части, близкий к нулю (0,06 мВ) в этих условиях. Изменение порядка обработки  $RD 200$  г/т +  $CaO$  усиливает наблюдаемый эффект.

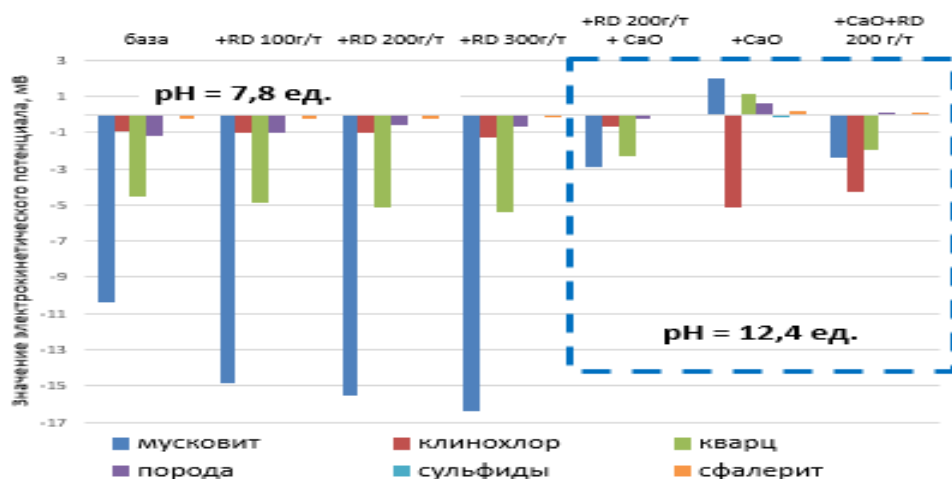


Рисунок 3 – Значения электрокинетических потенциалов в различных условиях дозирования депрессора

Флотация мономинеральных фракций подтвердила практически полное отсутствие подавляющего эффекта депрессора с расходом до 200 г/т на флотиремость сфалерита. Выход изученных кремнийсодержащих минералов снижается при расходе 200 г/т: с 18,8 до 6,6 % для кварца; с 23,0 до 18,8 % для мусковита; с 24,0 до 9,4 % для клинохлора.

Анализом рассчитанных констант скорости флотации (рис. 4) установлено, что максимальный эффект по депрессии наблюдается при обработке клинохлора. Константа скорости флотации клинохлора снижается в 4,3 раза, кварца на ~20 % отн., мусковита на ~5 % отн.

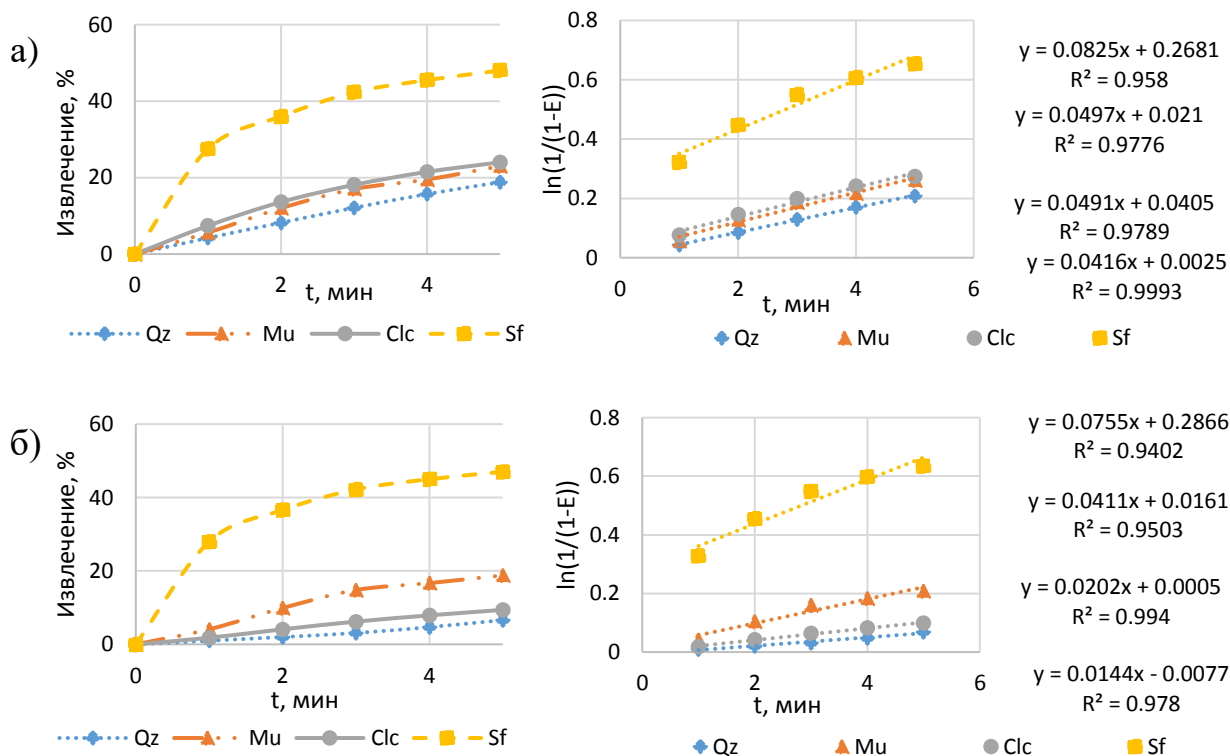


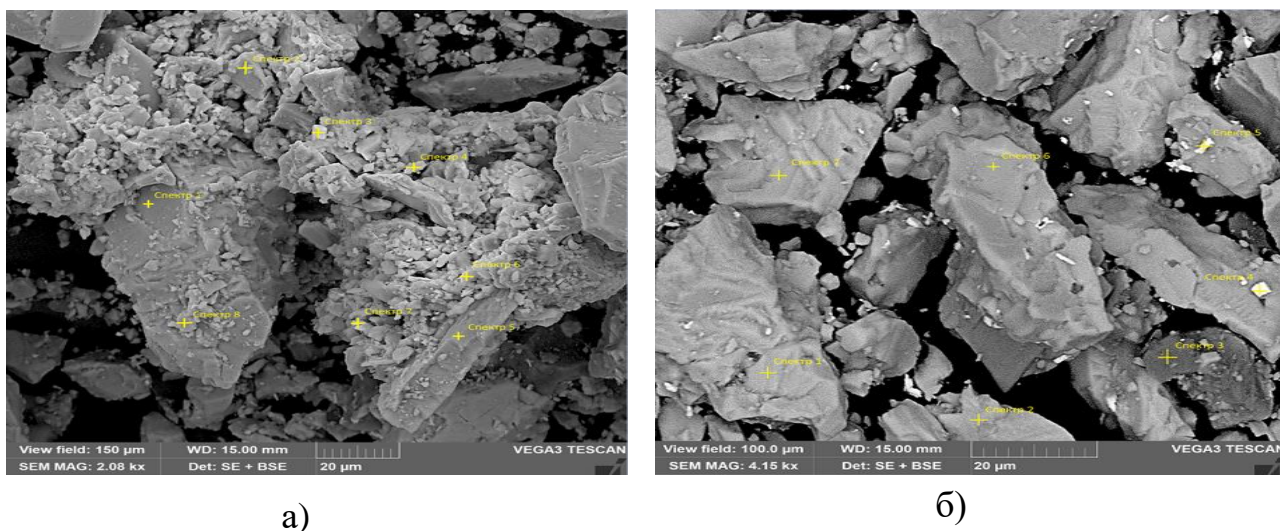
Рисунок 4 – Кинетика флотации минералов в базовом режиме (а) и с использованием нового депрессора (б): кварц (Qz); клинохлор (Clc); мусковит (Mu); сфалерит (Sf)

**Второе научное положение: Адсорбция высокомолекулярного депрессора RD-1033, содержащего сополимеры акриловых и карбоновых кислот, на поверхности кремнийсодержащих минералов с формированием супрамолекулярных структур повышает гидрофилизацию поверхности и приводит к агрегации частиц вследствие приближения дзета-потенциала минеральной поверхности к нулю и способности реагента к полимеризации, что обеспечивает эффективное отделение породных минералов от сфалерита и снижает их механический вынос в пенный слой.**

При проведении экспериментов по бесколлекторной флотации установлено, что 32,4 % нерудных минералов объекта исследований извлекается в пенный продукт благодаря своей природной флотуемости. Для их подавления проведено тестирование более чем 40 депрессоров и их смесей, включая серию образцов, разработанную компанией ООО «Кемикал Эр энд Ди». Учитывая особенности строения и свойства минералов, входящих в состав руды, разработчиками использованы подходы супрамолекулярной химии.

Установлено, что только органический высокомолекулярный депрессор RD-1033 селективен к кремнийсодержащим вмещающим породам. В открытом цикле операции цинк-пиритной флотации его применение позволило снизить извлечение  $\text{SiO}_2$  с 3,78 % до 1,45 % при некотором увеличении извлечения цинка.

Результаты изучения депрессирующей способности реагента RD-1033 при флотации исходной руды, позволили выбрать рациональный расход 200 г/т, при котором извлечение нерудных минералов в концентрат снижается на 6,35 % отн. (2,54 % абс.), а эффективность обогащения всех сульфидных минералов возрастает от 1,72 до 3,86 % абс. При использовании RD-1033 (рис. 5) поверхность крупных флотоактивных частиц сульфидов не покрыта частицами шламовой крупности.



а)

б)

Рисунок 5 – Изображения сканирующего электронного микроскопа образца концентрата, полученного в опыте без использования депрессора (а) и с использованием депрессора (б)

ИК-спектры высокомолекулярного депрессора, а также поверхности кварца (рис. ба) и сфалерита (рис.бб) до и после обработки раствором RD-1033 различной концентрации представлены на рисунке б.

На ИК-спектрах кварца, обработанного высокомолекулярным депрессором установлено увеличение широкой полосы в интервале  $3000-3700\text{ см}^{-1}$  за счет роста количества гидроксильных групп  $\text{OH}$ . Также отмечено увеличение пиков в области полос поглощения от  $500$  до  $1400\text{ см}^{-1}$ , что указывает на образование водородных связей поликремниевого скелета реагента с гидроксильными группами на поверхности кварца. Представленные на рисунке бб) спектры доказывают отсутствие взаимодействия депрессора с сфалеритом.

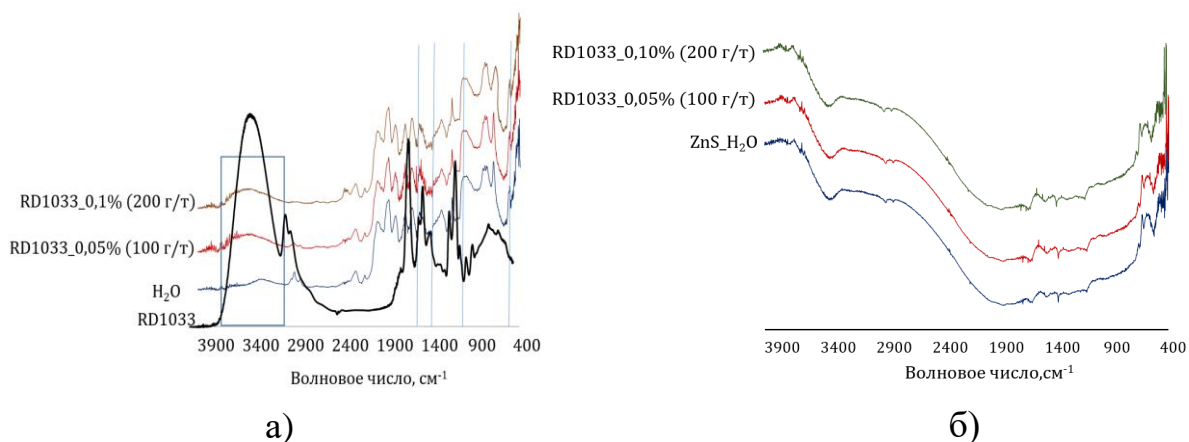


Рисунок 6 – ИК-спектры: а) депрессора (RD-1033) и поверхности кварца без обработки ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и после обработки депрессором различной концентрации (RD-1033\_0,1% и RD-1033\_0,05%); б) поверхности сфалерита в тех же условиях

Основной механизм действия реагента как депрессора кремнийсодержащих минералов заключается в образовании комплексов, в центре которых расположены молекулы поликремниевого матрицы, закрепленные водородными связями с гидроксильными группами поверхности клинохлора, кварца и мусковита.

Способность физической адсорбции депрессора и создание тонкопленочного гидрофильного покрытия на поверхности кремнийсодержащих минералов обеспечивается снижением поверхностного натяжения входящими в состав реагента аминами и многоатомными спиртами. Присутствующие в реагенте акриловые и карбоновые кислоты, закрепляясь через кремнийорганическую молекулу, способствуют агрегации шламов кремнийсодержащих минералов, в ходе которой частицы укрупняются, что доказано увеличением медианного размера частиц при обработке депрессором с  $6,2$  до  $10,5$  мкм. Образованная супрамолекулярная система за счет высокой молярной массы ( $M_r \gg 3000$ ) менее способна к механическому выносу и остается в камере флотомашин.



**Третье научное положение: Синергетический эффект обескремнивания цинкового концентрата (не менее чем на 32 % отн.) достигается комбинированным применением нового высокомолекулярного депрессора RD-1033 (расход 200-250 г/т) с результатами разработанной математической модели по регулированию механического выноса силикатов путем оптимизации содержания твердого, скорости вращения импеллера и расхода воздуха при флотации и превышает аддитивный эффект от раздельного применения данных способов обескремнивания (1,96 % абс.).**

*Разработка критерия шламуемости полиметаллических тонковкрапленных сульфидных руд*

В процессе разработки технологии обогащения руды Корбалихинского месторождения выявлено нарушение селективности флотационного процесса при содержании в пульпе более 40 % тонких и ультратонких частиц (-20 мкм) (рис. 9), что позволило принять данную гранулометрическую характеристику пороговым значением при разработке критерия шламуемости и предложить методике оценки склонности полиметаллических тонковкрапленных руд к ошламованию.

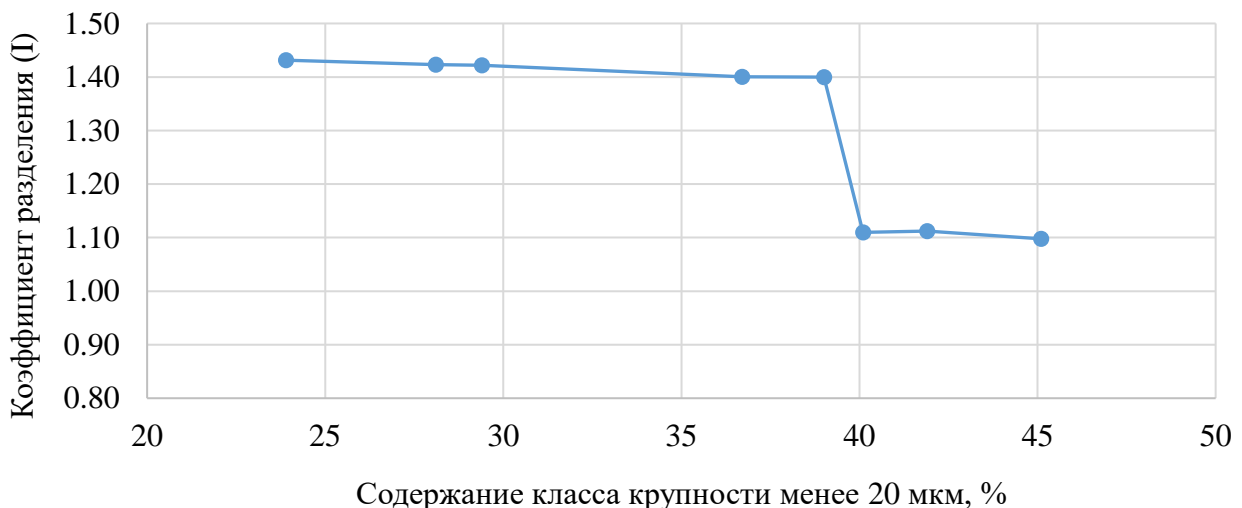


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента разделения (коэффициент селективности) от содержания шламовых частиц в питании флотации

При разработке критерия теоретически обосновано влияние содержания твердых и спайных минералов на склонность руды к ошламованию. С применением методов корреляционного анализа и аппроксимацией аналитической формулой были изучены зависимости физико-механических свойств минералов, входящих в состав полиметаллических тонковкрапленных руд с количеством частиц крупностью -20 мкм в пульпе, образованной при ее измельчении. На каждом этапе строили графические зависимости содержания частиц крупностью -20 мкм от значения, полученного при расчете по анализируемой формуле. В результате установлено, что критерий, основанный на физико-механических свойствах минералов и вычисляемый по формуле ( $K_{ш} = \frac{C_{со.сп.}}{C_{ТВ.}}$ ), позволяет выделить четкие границы, которые могут быть использованы для предиктивного отнесения полиметаллических тонковкрапленных руд к шламуемому типу. Руды с

$K_{ш} \leq 0,57$  и  $K_{ш} \geq 1,1$  обладают высокой склонностью к шламообразованию. При переработке таких руд может потребоваться разработка эффективных решений по снижению механического выноса шламов, загрязняющих пенный продукт.

Известно, что на механический вынос влияют плотность пульпы, расход воздуха и скорость вращения импеллера.

Зависимости извлечения (E) и селективности (I) от данных режимных параметров представлены на рисунке 10. Лабораторные эксперименты позволили определить рациональный диапазон регулирования режимных параметров, способный обеспечить необходимый уровень извлечения цинка при максимальном коэффициенте разделения сульфидов и минералов вмещающих пород:

- плотность пульпы (П) в диапазоне 20-30 %;
- расход воздуха (Р) от 1 до 3 л/мин;
- скорость вращения импеллера (С) от 30 до 40 с<sup>-1</sup>.

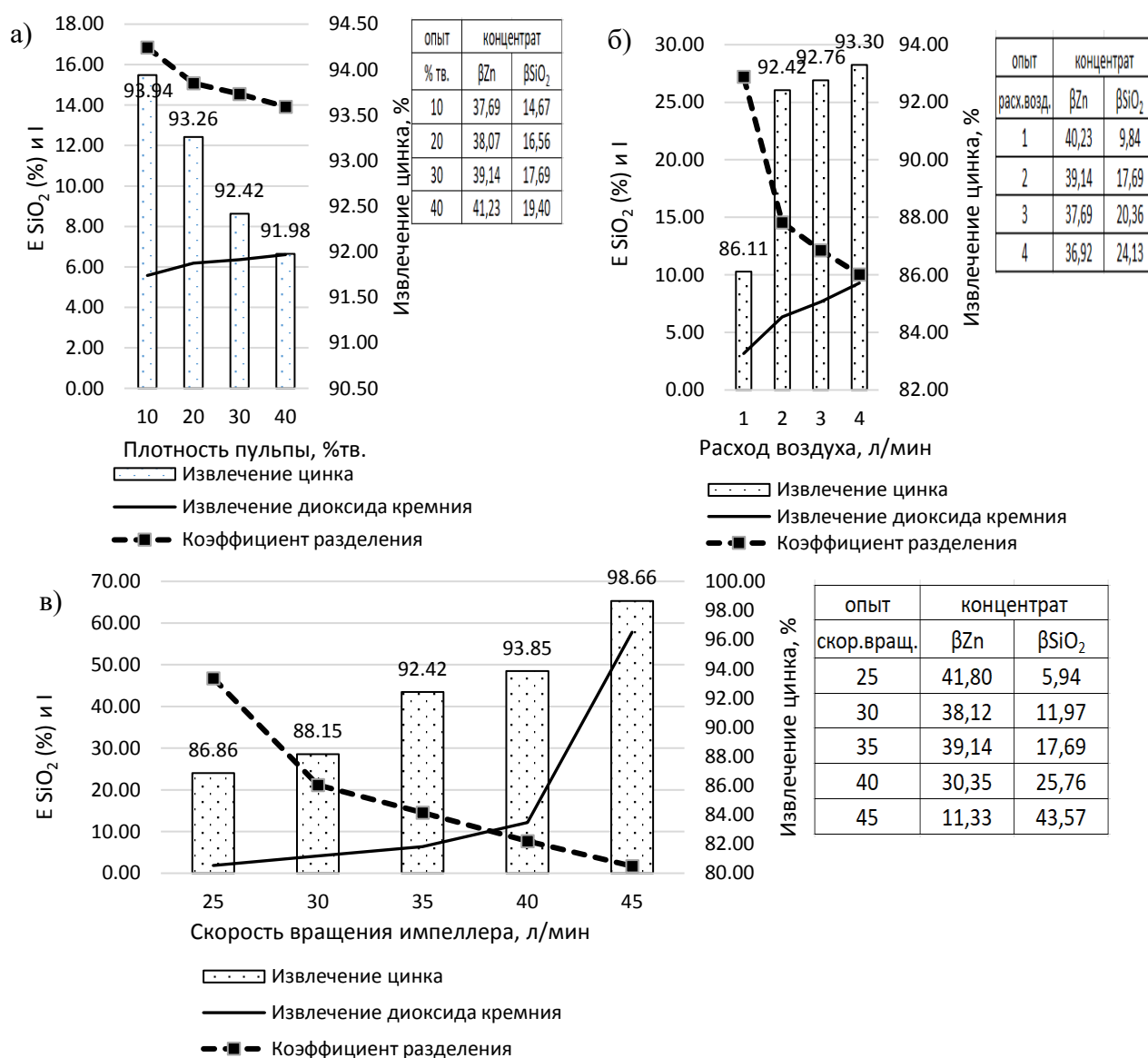


Рисунок 10 – Результаты тестов по определению влияния плотности пульпы (а), расхода воздуха (б) и скорости вращения импеллера (в)

Плотность пульпы, расход воздуха и скорость вращения импеллера приняты в качестве независимых факторов при проведении полного факторного эксперимента (ПФЭ) который позволил выявить их влияние при взаимодействии на коэффициент механического выноса. Середина диапазонов была принята за значения факторов на нулевом уровне модели.

Расчет коэффициента механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород ( $ENT_i$ ) в процессе флотации выполнен по формуле (1).

$$ENT_i = \frac{\varepsilon_{ent} \cdot (1 - \varepsilon_{water})}{(1 - \varepsilon_{overall}) \cdot \varepsilon_{water}}, \quad (1)$$

где:  $\varepsilon_{ent}$  – извлечение компонента в пенный продукт при бесколлекторной флотации, доли ед.;  $\varepsilon_{water}$  – извлечение воды в пенный продукт, доли ед.;  $\varepsilon_{overall}$  – извлечение компонента в пенный продукт при проведении эксперимента по полному реагентному режиму, доли ед.

Полученная модель (2) в натуральных значениях

$$ENT_p = -2,0403 + 0,063 \cdot П + 0,1029 \cdot Р + 0,0759 \cdot С - 0,00004 \cdot П \cdot Р - 0,0021 \cdot П \cdot С + 0,00022 \cdot П \cdot Р \cdot С - 0,0066 \cdot Р \cdot С \quad (2)$$

адекватна фактической тенденции и достоверно описывает процесс механического выноса компонентов нерудных минералов в зависимости от изменения режимных параметров в процессе флотации полиметаллической руды (критерий Кохрена 0,042). Анализ модели показал, что все три фактора оказывают сопоставимое влияние, а для эффективного снижения выноса необходимо комплексное управление их взаимодействием.

На рисунке 11 приведена проектная схема цепи аппаратов технологической схемы, с указанием мероприятий, обеспечивающих оптимальные режимные параметры процесса, определенные по результатам лабораторных исследований (с учетом коэффициентов перехода от лабораторного к промышленному процессу):

- 1) система разбавления пульпы, поступающей в операции перерешетного цикла флотации, для снижения содержания твердого более чем в 2 раза;
- 2) снижение на 10 % отн. скорости вращения импеллера флотомшины перерешетного цикла;
- 3) оптимизация расхода воздуха, подаваемого во флотоблоки основных операций. Подача воздуха по операциям снижена в диапазоне от 15 до 25 % отн.

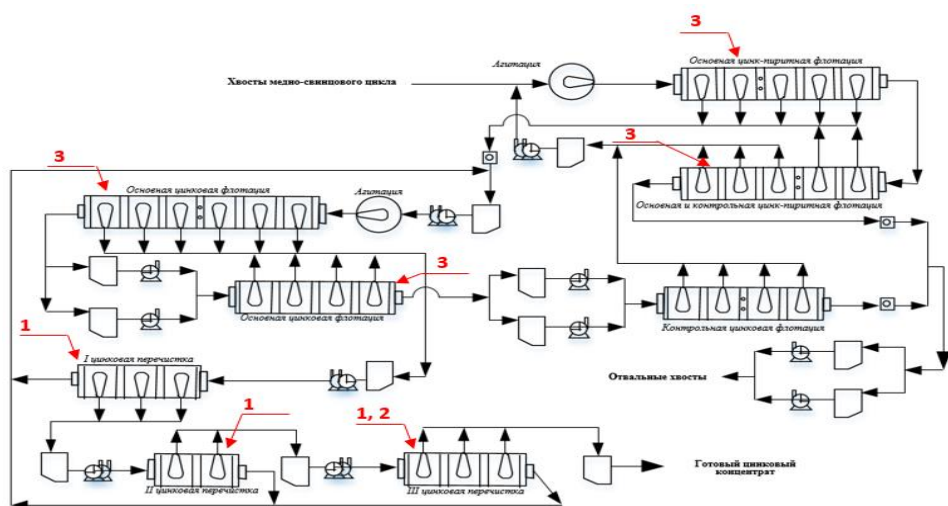


Рисунок 11 – Схема цепи аппаратов цинк-пиритного цикла переработки руды Корбалихинского месторождения

Данные товарных балансов до и после реализации в III и VI кварталах 2024 года подтвердили возможность снижения механического выноса кремнийсодержащих минералов. Зафиксирован рост качества цинкового концентрата за счет снижения на 15,66 % отн. (с 2,81 до 2,37 %) содержания  $\text{SiO}_2$  в нем, при сохранении качества концентрата (содержание Zn 52,1-52,9 %).

Эффективность действия депрессора была подтверждена в ходе неоднократных серий опытно-промышленных испытаний. Расчет технологических балансов показал возможность снижения содержания  $\text{SiO}_2$  в цинковом концентрате с базовых 2,84 до 2,43 % (14,44 % отн.). Содержание и извлечение цинка в концентрат в период опытно-промышленных испытаний составили 53,07 и 80,09 % соответственно, при базовых значениях – 52,8 и 80,79 % соответственно.

На основе полученных результатов подана заявка на патент РФ № 2025110459 от 23.04.2025 «Способ флотации сульфидных цинксодержащих руд цветных металлов».

Испытания разработанного комплекса способов показали, что массовая доля  $\text{SiO}_2$  в цинковом концентрате снижается с 2,97 % (базовая технология) до 2,02 %. Извлечение  $\text{SiO}_2$  по предлагаемой технологии снижено относительно базовой на 32 % отн. (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты контрольных лабораторных опытов

Наименование продукта	Выход, %	Массовая доля, %				Извлечение, %			
		Cu	Pb	Zn	$\text{SiO}_2$	Cu	Pb	Zn	$\text{SiO}_2$
Базовая технология									
Цинковый концентрат	11,96	1,59	2,48	52,31	<b>2,97</b>	82,68	48,62	93,38	0,84
Отвальные хвосты	88,04	0,05	0,36	0,50	47,42	17,32	51,38	6,62	99,16
Исходное питание	100	0,23	0,61	6,7	42,1	100	100	100	100
Внедрение разработанного комплекса									
Цинковый концентрат	11,91	1,6	2,48	52,63	<b>2,02</b>	82,85	48,42	93,56	0,57
Отвальные хвосты	88,09	0,04	0,36	0,49	47,52	17,15	51,58	6,44	99,43
Исходное питание	100	0,23	0,61	6,7	42,1	100	100	100	100

Минералогический анализ цинковых концентратов, выделенных по базовой и предлагаемой технологиям (рис. 12) подтверждает эффективную депрессию кремнийсодержащих минералов и минимизацию их механического выноса. Содержание кварца и мусковита снижено на 0,5 %, клинохлора с 3,4 до 0,6 %, что создает благоприятные условия для роста эффективности флотации сфалерита, содержание которого в концентрате увеличено на 1 % абс.

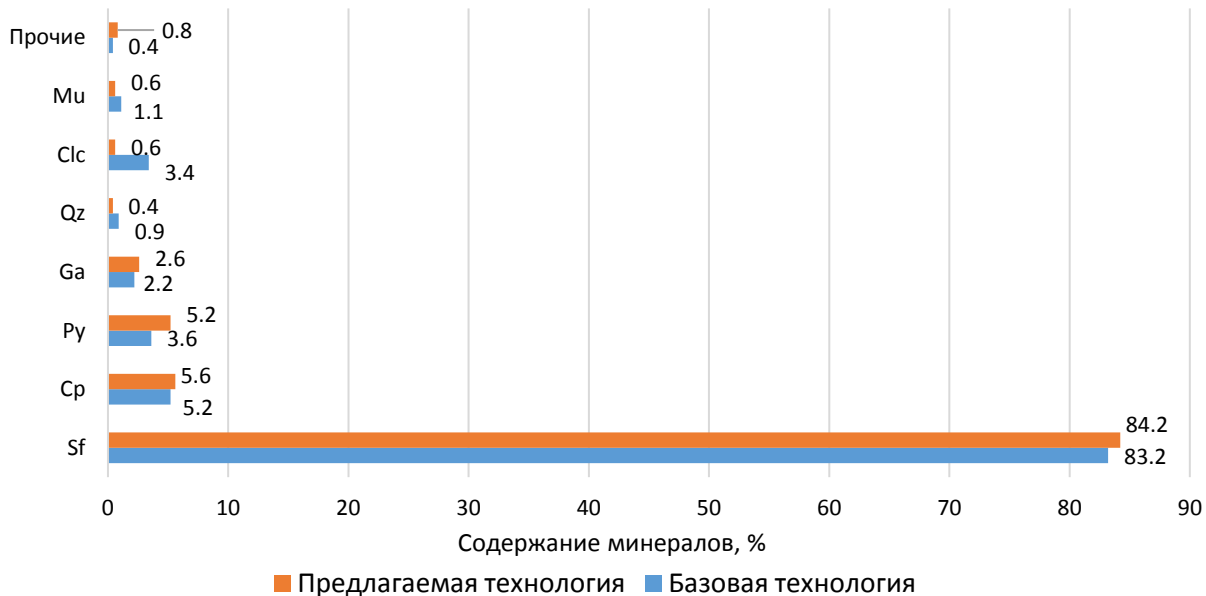


Рисунок 12 – Минералогический состав цинковых концентратов, выделяемых по базовой и предлагаемой технологии (Mu – мусковит, Clc – клинохлор, Qz – кварц, Ga – галенит, Py – пирит, Cr – халькопирит, Sf – сфалерит)

Ожидаемый эффект по снижению содержания  $\text{SiO}_2$  в цинковом концентрате от совместного внедрения разработанных способов составляет 30,04 % (15,66 % за счет подавления механического выноса и 14,44 % за счет депрессии). При этом, по данным контрольных испытаний, установлено снижение содержания  $\text{SiO}_2$  на 32 % отн., что объясняется их синергетическим эффектом (рис.13).

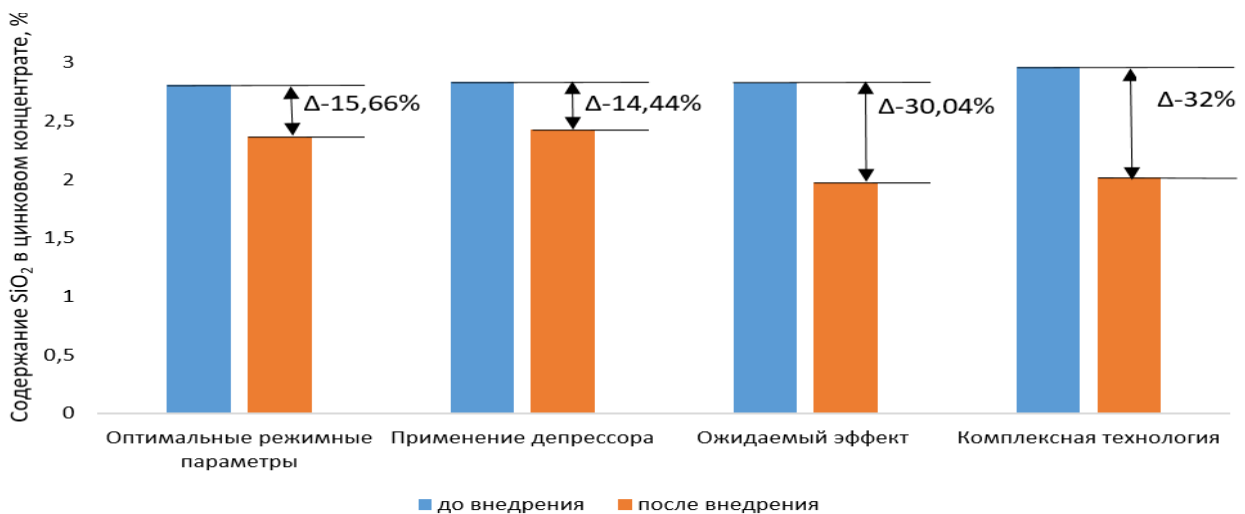


Рисунок 13 – Сводные результаты оценки эффективности применяемых способов повышения качества цинкового концентрата

Технико-экономическая оценка внедрения предлагаемых технических решений при условной производительности обогатительной фабрики по переработке полиметаллической руды Корбалихинского месторождения 1 000 тыс. т/год и выпуском цинкового концентрата 125 600 т в год (по базовой технологии) и 125 100 т в год (по разработанной технологии) показала, что снижение содержания  $\text{SiO}_2$  в цинковом концентрате на 0,95 % обеспечит годовой экономический эффект в размере 8 246,7 тыс.руб., срок окупаемости капитальных вложений составит менее 1 года (11,3 месяцев).

### Заключение

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения по разработке способов обескремнивания цинкового концентрата для повышения его качества, имеющие существенное значение для развития страны.

Основные выводы и практические результаты диссертационного исследования:

1. Изучение минералогических особенностей сульфидных тонковкрапленных полиметаллических руд, а также физико-механических свойств рудных и нерудных минералов, входящих в их состав, показало, что руды, склонные к шламообразованию, в большинстве случаев содержат твердых минералов либо менее 50 %, либо более 70 %; при этом доля твердых минералов, обладающих спайностью, составляет не менее 0,4 %, а доля мягких минералов, обладающих спайностью, составляет более 0,6 %.

2. Разработана методика оценки склонности руд к шламообразованию. Установлено, что при соотношении содержания в руде минералов, обладающих спайностью к содержанию твердых минералов ( $K_{ш}$ ) менее 0,57 и более 1,1, при измельчении до крупности -71 мкм >85 % формируется ошламованная пульпа с критическим содержанием класса -20 мкм свыше 40 %, что при содержании твердого в пульпе 35 %, характерной для основных операций флотации, является причиной резкого снижения коэффициента селективности ( $I = \frac{\varepsilon_{\text{сульф}}}{\varepsilon_{\text{нер}}}$ ).

3. Изучение теории и практики получения цинковых концентратов показало, что основными причинами снижения селективности и извлечения примесных элементов вмещающих пород в концентрат являются: природная флотоактивность, неселективное налипание на частицы сульфидов флотоактивной крупности и их механический вынос. Наиболее актуальными и перспективными способами снижения извлечения кремнийсодержащих минералов являются применение депрессоров и управление механическим выносом, негативное влияние которого возрастает с увеличением шламуемости руды.

4. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены эффективность применения высокомолекулярного депрессора и одновременной корректировки плотности пульпы ( $\Pi$ ), расхода воздуха ( $P$ ) и скорости вращения импеллера ( $C$ ), на механический вынос шламов вмещающих пород и снижение их извлечения в цинковый концентрат.

5. Определен рациональный диапазон регулирования режимных параметров, способный обеспечить необходимый баланс между извлечением цинка и коэффициентом разделения сульфидов и минералов вмещающих пород: плотность пульпы в диапазоне 20-30 %; расход воздуха от 1 до 3 л/мин.; скорость вращения импеллера от 30 до 40 с<sup>-1</sup>.

6. Проведением полного факторного эксперимента получена математическая модель, достоверно описывающая закономерности изменения механического выноса компонентов нерудных минералов в зависимости от изменения режимных параметров в процессе флотации полиметаллической руды:

$$ENT_p = -2,0403 + 0,063 \cdot П + 0,1029 \cdot Р + 0,0759 \cdot С - \\ - 0,00004 \cdot П \cdot Р - 0,0021 \cdot П \cdot С + 0,00022 \cdot П \cdot Р \cdot С - 0,0066 \cdot Р \cdot С$$

7. Установлены зависимости влияния расхода депрессора на флотируемость, дзета-потенциал и ИК-спектры кремнийсодержащих минералов и сфалерита, которые позволили определить область расхода депрессора, приводящего к наибольшему снижению извлечения кремнийсодержащих минералов и его селективность к кремнийсодержащим минералам вмещающих пород. Краевой угол смачивания кварца (С=0,01 % или 200 г/т) снижается с 56,9 до 29 градусов; ζ-потенциал нерудных минералов приближается к изоэлектрической точке, что повышает вероятность агрегации кремнийсодержащих шламов; константа скорости флотации снижена у клинохлора в 4,3 раза, у кварца на ~20 % отн., у мусковита на ~5 % отн. Изучением ИК-спектра поверхности кварца установлено увеличение ширины полосы, характерной для гидроксильных групп ОН<sup>-</sup> (3000 – 3700 см<sup>-1</sup>) и зафиксировано увеличение пиков в области полос поглощения от 500 до 1400 см<sup>-1</sup>, что указывает на образование водородных связей поликремниевого скелета реагента с гидроксильными группами на поверхности кварца.

8. Предложен селективный к кремнийсодержащим вмещающим породам высокомолекулярный органический депрессор и установлен механизм его действия, который заключается в образовании комплекса, в центре которого расположены молекулы поликремниевого матрицы, соединяющиеся водородными связями с поверхностью кварца, клинохлора и мусковита. Способность физической адсорбции депрессора и создание тонкопленочного гидрофильного покрытия на поверхности кремнийсодержащих минералов обеспечивается снижением поверхностного натяжения входящими в состав реагента аминами и многоатомными спиртами. Присутствующие в реагенте акриловые и карбоновые кислоты, закрепляясь через кремнийорганическую молекулу, способствуют агрегации шламов кремнийсодержащих минералов, в ходе которой частицы укрупняются, что доказано увеличением медианного размера частиц при обработке депрессором с 6,2 до 10,5 мкм. Образованная супрамолекулярная система, за счет высокой молярной массы ( $M_r \gg 3000$ ), менее способна к механическому выносу и остается в камере флотомашин.

9. Опытными-промышленными испытаниями подтверждено снижение массовой доли SiO<sub>2</sub> в цинковом концентрате за счет: снижения механического выноса шламов вмещающих пород на 15,66 % отн. (с 2,81 до 2,37 %) (Акт от 14.01.2026)

и депрессии кремнийсодержащих минералов вмещающих пород высокомолекулярным депрессором с 2,84 до 2,43 % (14,44 % отн.) (Акт от 26.05.2025). Реализация комплексной технологии, сочетающей оба подхода, обеспечивает синергетический эффект, выражающийся в снижении содержания диоксида кремния в цинковом концентрате не менее чем на 32 % отн., что превышает аддитивный ожидаемый эффект (30,04 % отн.).

10. Испытаниями разработанной комплексной технологии доказано снижение содержания  $\text{SiO}_2$  в цинковом концентрате с 2,97 % (базовая технология) до 2,02 %, что обеспечит годовой экономический эффект в размере 8 246,7 тыс.руб. со сроком окупаемости капитальных вложений менее 1 года (11,3 месяцев).

На основании выполненных исследований рекомендуется для повышения качества цинковых концентратов на действующих предприятиях, перерабатывающих тонковкрапленные полиметаллические руды, склонные к шламообразованию (с критерием  $K_{\text{ш}} < 0,57$  и  $K_{\text{ш}} > 1,1$ ), а также при проектировании новых обогатительных фабрик, применять комплексный подход, включающий оптимизацию плотности пульпы, скорости вращения импеллера и расхода воздуха совместно с использованием селективного высокомолекулярного органического депрессора.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. **Арабаджи Я.Н.** Аспектный анализ механизмов загрязнения сульфидных концентратов шламами из вмещающих пород и обзор методов его снижения / Я.Н. Арабаджи, Н.Н. Орехова, К.И. Абдрахманов, Э.И. Абдрахманов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – С. 55-70.

2. **Арабаджи Я.Н.** Снижение механического выноса кремнийсодержащих минералов вмещающих пород в концентрат путем оптимизации режимных параметров технологического процесса / Я.Н. Арабаджи, Н.Н. Орехова, А.Ю. Тюленев, Л.П. Баранова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23. – № 2. – С. 18-27.

3. **Арабаджи Я.Н.** Изучение влияния депрессора на изменение физико-химических свойств поверхности минералов / Я.Н. Арабаджи, Д.А. Кизяев, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2025. – № 4. – С. 19-30.

*Прочие публикации*

4. **Арабаджи Я.Н.** Повышение качества цинкового концентрата оптимизацией режимных параметров флотации / Я.Н. Арабаджи // Недропользование и транспортные системы. – 2025. – Т. 15. – № 1. – С. 23-29.

5. **Арабаджи Я.Н.** Факторный анализ снижения механического выноса нерудных минералов в цинковый концентрат / Я.Н. Арабаджи, Н.Н. Орехова // Тезисы Московского международного конгресса обогатителей (ММКО-2025)

(г. Москва, 11-14 марта 2025 г.) – М.: Издательский Дом «Графит». – 2025. – С. 58-59.

6. **Арабаджи Я.Н.** Поиск эффективных методов и механизмов повышения качества сульфидных концентратов / Я.Н. Арабаджи // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения – 2024): материалы международной конференции. – Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН. – 2024. – С. 322-325.

7. **Арабаджи Я.Н.** Разработка критерия шламуемости сульфидных руд / Я.Н. Арабаджи, Н.Н. Орехова, О.Е. Горлова // В сборнике: Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. Магнитогорск, 2025. – С. 154-159.

8. **Арабаджи Я.Н.** Обоснование режимов цинковой флотации в технологии обогащения полиметаллических сульфидных руд для снижения доли кремния в концентрате / Я.Н. Арабаджи, Н.Н. Орехова // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2025): материалы международной конференции. – Екатеринбург: Изд-во «Форт-Диалог Исеть». – 2025. – С. 249-250.

9. **Арабаджи Я.Н.** Техничко-экономические аспекты внедрения разработанных технологических решений повышения качества флотационного концентрата / Я.Н. Арабаджи, Н.Н. Орехова // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2025): материалы международной конференции. – Екатеринбург: Изд-во «Форт-Диалог Исеть». – 2025. – С. 251-252.

Подписано в печать 16.04.2026. Формат 60 x 90 / 16.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз. Зак. 034к.

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83