

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и
инновационной работе

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

Олег Николаевич Тулупов



10. МАРТА 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Диссертация «Разработка комплексной технологии снижения диоксида кремния в цинковом концентрате при флотации тонковкрапленных полиметаллических руд» выполнена на кафедре геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых.

В период подготовки диссертации соискатель была прикреплена для подготовки диссертации без освоения программы аспирантуры к кафедре обогащения полезных ископаемых федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации Арабаджи Яна Николаевна работала в открытом акционерном обществе "Уральская горно-металлургическая компания", г. Верхняя Пышма, Россия в должности главного специалиста управления обогатительного производства.

В 2007 г. Арабаджи Яна Николаевна окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Норильский индустриальный институт» по направлению «Металлургия цветных металлов». Квалификация инженер, диплом ВСГ 1142890.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2024 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель – доцент, доктор технических наук Орехова Наталья Николаевна, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых федерального государственного бюд-

жетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

По итогам обсуждения диссертации «Разработка комплексной технологии снижения диоксида кремния в цинковом концентрате при флотации тонковкрапленных полиметаллических руд» принято следующее заключение.

Диссертационная работа Арабаджи Я.Н. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых, содержит новые научно-обоснованные технологические решения по снижению содержания диоксида кремния в цинковом концентрате за счет применения высокомолекулярного органического депрессора кремнийсодержащих минералов вмещающих пород RD-1033 и использования разработанной математической модели управления механическим выносом шламов нерудных минералов в пенный продукт.

Актуальность работы обусловлена следующими факторами:

1. ухудшением качества сырья: истощение богатых месторождений ведет к увеличению доли в переработке бедных, тонковкрапленных и труднообогащаемых цинковых руд, требующих тонкого измельчения. Тонкий помол приводит к увеличению доли мелких (шламовых) частиц, что резко повышает загрязнение цинкового концентрата диоксидом кремния (SiO_2) из вмещающих пород за счет механического выноса и неселективной флотации;

2. жесткими экономическими и технологическими требованиями: современные металлургические предприятия предъявляют высокие требования к качеству концентратов. Даже в пределах кондиций повышенное содержание SiO_2 ведет к значительным финансовым потерям для производителей (например, убытки ~650 тыс. руб. на 1000 тонн концентрата при росте SiO_2 на 1%);

3. недостаточной эффективностью существующих методов: Снижение содержания SiO_2 ниже 3% при высоком его содержании в руде (35-40%) и сложном срастании минералов традиционными способами затруднительно и малоэффективно.

Таким образом, разработка новых высокоэффективных способов глубокого обескремнивания цинкового концентрата является критически важной научно-технической задачей для повышения рентабельности и конкурентоспособности предприятий, перерабатывающих труднообогащаемые цинковые руды.

Перспективными направлениями для снижения содержания минералов вмещающих пород во флотационных концентратах являются: применение депрессоров, селективных к кремнийсодержащим минералам; а также углублённое изучение влияния управляющих операций флотации регули-

руемых факторов на механический вынос тонких породных частиц с целью создания эффективных условия для его снижения.

Идея работы заключается в повышении контрастности свойств сфалерита и кремнийсодержащих породных минералов и использовании закономерностей влияния регулируемых технологических параметров флотации на механический вынос породных минералов шламовой крупности в пенный продукт.

Целью работы является разработка технологических решений для снижения содержания 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 шламообразования руды 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 её 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.

Методы и методология исследования.

Методология исследования

Работа основана на комплексном экспериментально-аналитическом подходе, включающем современные методы анализа, лабораторные и опытно-промышленные испытания, изучение физико-химических свойств и математическое моделирование. Методология обеспечивает верификацию результатов от фундаментальных исследований до технологической оптимизации.

Исследование построено по следующей логической схеме.

– Всесторонний анализ сырья и продуктов: Определены химический (ICP-OES, AAS), минералогический (ТМА, микроскопия) и гранулометрический (лазерный, ситовой анализ) составы.

– Технологические флотационные испытания: Эффективность нового органического депрессора RD-1033 последовательно оценивалась в лабораторных условиях – от тестов на мономинералах и в открытом цикле до подтверждения в замкнутой технологической схеме, имитирующей промышленный процесс и опытно-промышленных испытаний.

– Фундаментальное изучение механизмов действия реагента на поверхности раздела фаз. Для расшифровки действия реагента применялись методы физико-химического анализа: измерение краевого угла смачивания, ζ -потенциала, ИК-спектроскопия и квантово-химическое моделирование. Это позволило установить механизм селективной депрессии кремнийсодержащих минералов.

– Количественная оценка и оптимизация механического выноса: Разработана специальная методика для измерения доли механического выноса шламов. С помощью планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) изучено влияние ключевых технологических параметров (плотность пульпы, расход воздуха, скорость импеллера) и построена адекватная математическая модель для прогноза и управления этим процессом.

Научная новизна

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, флотируемость) для кремнийсодержащих минералов [кварц, мусковит, клинохлор] и сфалерита.

1. 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 поверхно-

сти 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.

2. 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.

Практическая значимость исследования заключается в создании и внедрении комплекса технологических решений для улучшения качества цинкового концентрата при переработке труднообогатимых полиметаллических руд с тонким вкраплением. Разработанная технология уже применяется в производстве АО «Сибирь - Полиметаллы».

Внедрен новый реагентный режим на основе разработанного селективного депрессора RD-1033 минералов: кварца, клинохлора, мусковита. Механизм действия реагента основан на формировании супрамолекулярных гидрофильных комплексов, что позволяет целенаправленно снижать флотируемость 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 цинкпиритного цикла флотации внедрены в действующее производство по получению цинкового концентрата на Рубцовской обогатительной фабрике (ОФ).

Реализация разработанного комплекса мер управления технологией позволяет снизить извлечение SiO_2 в концентрат на 30-35 % отн.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; проведении экспериментальных испытаний, оценке закономерностей процессов и определении механизма действия органического депрессора кремнийсодержащих минералов, непосредственном участии в проведении лабораторных и опытно-промышленных испытаний, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке научных публикаций и докладов. Все результаты получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии.

Достоверность результатов подтверждается 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.

Ценность научных работ соискателя состоит в том, что в них отражены основные положения и результаты диссертационного исследования: представлены определение цели и идеи исследования, результаты экспериментальных исследований, разработана комплексная технология снижения содержания диоксида кремния в цинковом концентрате.

Все публикации открытые, ограничений к изданию автореферата и диссертации нет.

Полнота изложения. Материалы диссертации достаточно полно представлены в публикациях соискателя. Основные положения диссертации опубликованы в 9 научных работах, из них: 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ; 6 – в прочих изданиях.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. В диссертации отсутствуют результаты научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве, без ссылок на соавторов, а также заимствованный материал без ссылки на автора или источник заимствования.

Содержание диссертации, научные положения, основные результаты и выводы **соответствуют областям исследований научной специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых**, а именно пункту 1 «Технологическая минералогия. Изучение взаимосвязи состава, структуры, физических

свойств и генетических особенностей минерального вещества с его технологическими свойствами. Технологическая оценка минерального сырья», пункту 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. Физико-химические и энергетические методы интенсификации процессов обогащения и выщелачивания природного и техногенного минерального сырья».

Диссертация **соответствует требованиям, установленным пунктами 9, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г., №842.**

Диссертация «Разработка комплексной технологии снижения диоксида кремния в цинковом концентрате при флотации тонковкрапленных полиметаллических руд» Арабаджи Яны Николаевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых.

Присутствовало на заседании кафедры 16 чел. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Протокол №1 от 5 марта 2026 г.



Гришин Игорь Анатольевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского
дела и обогащения полезных ископаемых

