

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт горного дела им. Н. А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук



 А.П. Хмелинин

14 » 109 _____ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Арабаджи Яны Николаевны «Разработка комплексной технологии снижения диоксида кремния в цинковом концентрате при флотации тонковкрапленных полиметаллических руд», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

Актуальность темы диссертации

Истощение богатых месторождений ведет к увеличению доли в переработке бедных, тонковкрапленных и труднообогатимых цинковых руд. Непрерывное развитие технологий их переработки требует, в том числе, более тонкого помола для раскрытия цинксодержащих сульфидов, что неизбежно приводит к увеличению доли частиц шламовой крупности в питании флотации. Это повышает загрязнение цинкового концентрата диоксидом кремния (SiO_2) из вмещающих пород за счет механического выноса и неселективной флотации. Снижение содержания SiO_2 ниже 3% при высоком его содержании в руде (35-40%) и сложном срастании минералов традиционными способами затруднительно и малоэффективно. В связи с чем, поиск способов обескремнивания цинкового концентрата ниже кондиций является актуальной задачей для отрасли и ресурсосбережения государства.

Научная новизна диссертации заключается в том, что:

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, флотируемость) 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.

Практическая значимость полученных автором диссертации результатов подтверждена Актами промышленных результатов и практической реализацией.

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.

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.

Кроме того, повышенное содержание диоксида кремния в цинковом концентрате снижает товарность концентрата поскольку современная стратегия взаиморасчетов предполагает снижение цены на концентрат при увеличении в нем кремнезёма даже в рамках кондиций. Например, при увеличении содержания SiO_2 в цинковом концентрате марки КЦ-2 на 1 %, производитель может понести убытки при продаже 1 000 ВМТ в размере более 650 тыс.руб.

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 оптимиза-

ции технологических решений (при совершенствовании действующих производств, а также разработке технологий для новых месторождений), направленных на снижение механического выноса шламов вмещающих пород.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы 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: представлено определение цели и идеи исследования; результаты экспериментальных исследований, разработана комплексная технология снижения содержания диоксида кремния в цинковом концентрате.

Полнота опубликования результатов диссертационного исследования. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях. 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.

Структура и основное содержание диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 109 наименований, содержит 154 страницы машинописного текста, 48 рисунков, 34 таблицы, 4 приложения.

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.

Во второй главе описаны методы исследования объекта, схемы флотационных экспериментов и режимные параметры.

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.

В четвертой главе приведены результаты изучения влияния обработки депрессором на физико-химические свойства минералов и их флотируемость.

Изучается депрессирующая способность высокомолекулярного органического реагента RD-1033.

В пятой главе представлены результаты испытаний разработанных способов обескремнивания цинкового концентрата и оценки экономической эффективности от их внедрения.

В заключении соискателем Арабаджи Я.Н. приводятся основные научные результаты и выводы работы.

Замечания по работе:

1. В работе (разделе 2.4. «Методика изучения механического выноса») изучался вопрос механического выноса тонких частиц в пенный продукт. Механический вынос тонких частиц минералов рассматривался как результат их захвата попутным потоком воды и транспортировки в пенный слой. При флотации с собирателем не исключена минерализация пузырьков тонкими частицами вмещающих пород при малых или нулевых краевых углах, что автор не относит к истинной неселективной флотации, но и не считает механическим выносом. Увеличение числа оборотов импеллера и инерционных сил отрыва позволяет частично решить вопрос деминерализации газовой фазы небольшим количеством частиц. Для флотации тонкого материала требуется соответствующая конструкция флотационной машины.

2. В разделе 3.2. «Основные признаки, определяющие ошламованность пульпы» частицы менее 20 мкм, нарушающие селективность флотационного процесса, автором отнесены к тонким частицам, а частицы менее 10 мкм — к шламам. Такая граница условна и должна рассматриваться в привязке к конкретным конструкциям флотомашин. Развитая турбулентность, локализованная в приимпеллерной зоне, позволит селективно флотировать частицы менее 10 мкм и не относить их к шламовым и трудноизвлекаемым.

3. На рисунке 24. Стр. 78. Представлены результаты серии тестов по определению влияния скорости вращения импеллера на эффективность флотации. Конструктивное оформление флотомашин, на которой выполнялись эксперименты с повышенной скоростью вращения импеллера, не отвечает требованиям флотации тонких частиц. Интенсивное турбулентное движение должно быть локализовано в приимпеллерной зоне. В остальном объеме камеры флотомашин в основном должен сохраниться транспортный поток.

4. Автор утверждает (стр. 98.), что с увеличением концентрации раствора БКК краевой угол смачивания кварца возрастает, но остаётся меньше угла естественной гидрофобности, что трактуется как эффективное закрепление депрессора и исключение взаимодействия с собирателем. Взаимодействия БКК с кварцем нет, но есть осадки ксантогенатов металлов, которые могут повысить краевой угол и флотируемость минерала (см. **Liu B., Wang X., Du H., Liub J., Zheng S., Zhanga Y., Miller J. D.** The surface features of lead activation in amyl

xanthate flotation of quartz / International Journal of Mineral Processing. – 2016. – Vol.151. – P. 33–39).

5. На рисунке 37 стр. 103 приведены экспериментальные графики изменения ζ -потенциала сфалерита и нерудных минералов (кварца) в зависимости от pH среды. Поверхность сфалерита склонна к окислению, образуя гидрофильные продукты (гидроксиды цинка), что делает знак потенциала зависимым от концентрации ионов H^+ и OH^- , как и кварца. В связи с этим не ясно, по какой причине с увеличением pH (NaOH) ζ -потенциал стремится к положительным значениям при увеличении концентрации гидроксила. Подача депрессора, содержащего азот, в данном эксперименте не предусматривалась.

6. Измерение дзета-потенциала, стр. 107. “Отмеченные различия обуславливают снижение флотуемости частиц породы и бедных сростков сфалерита с ними при использовании анионного собирателя по электростатическому механизму, что в дополнение к повышению вероятности агрегации кремнийсодержащих шламов свидетельствует об эффективном действии реагента”. На флотуемость основное влияние оказывает наличие двух форм сорбции химической и физической. Флотуемость достигает максимальной эффективности в строго локализованных областях pH, которые характерны для данного типа реагента (например, pH гидролиза для несурьфидов, образования диксантогена или ксантогенатов металла для сульфидов) и независимы от существенных различий в заряде поверхности минералов (см. **Pugh R.J.** The role of the solution chemistry of dodecylamine and oleic acid collectors in the flotation of fluorite / Colloids and Surfaces. – 1986. – Vol. 18. – P. 19-41). Электростатический механизм характерен в основном для катионных собирателей.

В целом диссертационная работа Арабаджи Яны Николаевны «Разработка комплексной технологии снижения диоксида кремния в цинковом концентрате при флотации тонковкрапленных полиметаллических руд» произвела благоприятное впечатление. Автор уверенно ориентируется в излагаемом материале, продемонстрировал системный подход к проблеме тонких частиц, а указанные замечания ни в коей мере не снижают общей положительной оценки результатов, полученных в диссертационной работе. Текст автореферата соответствует содержанию диссертации.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании лаборатории «Обогащение полезных ископаемых и технологической экологии» ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН) (протокол № 5 от 11 мая 2026г.). Результаты голосования: «за» - 7, «против» - нет, «воздержались - нет».

Заключение

Диссертационная работа Арабаджи Яны Николаевны «Разработка комплексной технологии снижения диоксида кремния в цинковом концентрате при флотации тонковкрапленных полиметаллических руд», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых», соответствует критериям, установленным пунктами 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции. Автор диссертации, Арабаджи Яна Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. «Обогащение полезных ископаемых».

Я, Кондратьев Сергей Александрович, даю согласие на обработку своих персональных данных в документах, связанных с работой диссертационного совета.

Кондратьев Сергей Александрович,
доктор технических наук, заведующий
лабораторией обогащения полезных
ископаемых и технологической
экологии ИГД СО РАН, г.н.с. (специальность
25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых)

 С.А. Кондратьев

11 мая 2026 г.

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГД СО РАН), 630091, Новосибирская область, город Новосибирск, Красный проспект, д.54.

Официальный сайт: <http://www.misd.ru>

Телефон: +7 (383) 205-30-30

Адрес электронной почты: mailigd@misd.ru

Подпись Кондратьева С.А. заверяю,
ученый секретарь ИГД СО РАН,
кандидат технических наук



Коваленко К.А.