

На правах рукописи



УРАЗОВА Юлия Викторовна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ
ВОЛЬФРАМОВЫХ РУД
В УСЛОВИЯХ ЗАМКНУТОГО ВОДОБОРОТА
(НА ПРИМЕРЕ ТЫРНЫЯУЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2026

Работа выполнена в Иркутском научно-исследовательском институте благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»)

- Научный руководитель:** **Чикин Андрей Юрьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», Педагогический институт, кафедра технологий, предпринимательства и методик их преподавания (г. Иркутск)
- Официальные оппоненты:** **Матвеева Тамара Николаевна**
доктор технических наук,
ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук», заведующая отделом проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья (г. Москва)
- Прохоров Константин Валерьевич**
кандидат технических наук,
ФГБУН «Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук», Институт горного дела, ведущий научный сотрудник, руководитель центра коллективного пользования «ЦИМС» (г. Хабаровск)
- Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» (г. Чита)

Защита состоится «18» июня 2026 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.307.01 в ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу <http://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, ИРНТУ; ученому секретарю диссертационного совета 24.2.307.01 Вулых Н.В.

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

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



Н.В. Вулых

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Современные технологии обогащения полезных ископаемых требуют комплексного подхода к управлению водным режимом, особенно в условиях замкнутого водооборота. При переработке кальцийсодержащих вольфрамовых руд качество оборотной воды становится критическим фактором, влияющим на эффективность флотации и стабильность технологических показателей. Накопление солей, карбонатов и силикатов в оборотной воде приводит к ухудшению условий разделения минералов, снижению извлечения целевого компонента и увеличению расхода реагентов.

Вопросами совершенствования технологии обогащения руд в условиях замкнутого водооборота занимаются многие отечественные и зарубежные ученые: Абрамов А.А., Морозов В.В., Пестряк И.В., Дзюбинский Ф. А., Феофанов В.А., Жданович Л.П., Надршин В.В., Двойченкова Г.П., Чантурия Е.Л., Коваленко Е.Г., Lin, S., Liu, R., Wu, M., Hu, Y., Sun, W., Shi, Z., Muzenda, E., Nuorivaara, T., Björkqvist, A., Vacher, J., Serna-Guerrero, R.

Особую актуальность приобретает разработка методов кондиционирования оборотной воды, направленных на удаление мешающих примесей и стабилизацию флотационного процесса. В этом контексте выбор эффективного реагента-собирателя, способного работать в условиях высокой минерализации, является ключевым направлением исследований. Использование таллового масла в качестве альтернативы традиционной олеиновой кислоте представляет собой перспективное решение, учитывающее как экономические, так и экологические аспекты. Работы авторов Глуханова А.А., Третьякова С.И., Поповой Л.М., Курзина А.В., Вершилова С.А., Klemmera, Hukki и Vertanen заложили основу для понимания химической природы таллового масла, что позволяет рассматривать его как перспективный реагент для флотационных процессов.

Для эффективного обогащения минерального сырья в условиях как открытого, так и замкнутого водооборота необходимо детальное изучение механизма взаимодействия реагента-собирателя с минеральной поверхностью. Недостаточная изученность вопросов адсорбции и специфики взаимодействия собирателей с кальцийсодержащими вольфрамовыми минералами особенно актуальна в условиях замкнутого водооборота, где измененный ионный состав существенно влияет на флотационные показатели. Дополнительную значимость приобретает исследование процессов соленакопления и роли модификаторов среды, поскольку сложный ионный состав воды оказывает негативное влияние на адсорбцию реагентов и поверхностные свойства минералов.

Таким образом, работа направлена на решение актуальной задачи повышения эффективности и экологической безопасности процессов обогащения кальцийсодержащей вольфрамовой руды за счет комплексной оптимизации водоподготовки и реагентного режима флотации.

Идея работы. Комплексная оптимизация реагентного режима и режима водоподготовки для флотации кальцийсодержащей вольфрамовой руды обеспечивает высокие технологические показатели обогащения.

Цель работы. Разработка научно обоснованных технологических решений, обеспечивающих эффективное флотационное обогащение

кальцийсодержащих вольфрамовых минералов в условиях замкнутого водооборота, стабилизацию качества оборотной воды и повышение извлечения целевого компонента.

Объект исследования – скарновая руда Тырнаузского месторождения.

Предмет исследования – закономерности флотационного обогащения кальцийсодержащей вольфрамовой руды в условиях замкнутого водооборота.

Задачи исследования.

- Определить оптимальный реагентный режим флотационного обогащения в открытом цикле, отвечающий необходимым рекомендованным показателям содержания и извлечения ценных компонентов.
- Провести анализ влияния накопления карбонатов и силикатов в оборотной воде на эффективность флотации.
- Определить оптимальные концентрационные диапазоны примесей, при которых их влияние на процесс обогащения находится в допустимых пределах, и разработать методику снижения их содержания посредством кондиционирования оборотной воды.
- Исследовать механизм взаимодействия кальцийсодержащих минералов с реагентом-собирателем, талловым маслом, в условиях открытого и замкнутого водооборота и при кондиционировании оборотной воды.
- Испытать технологические решения в полупромышленных условиях с применением замкнутого водооборота на кондиционированной воде, разработать технологический регламент и определить технико-экономические показатели.

Методология и методы исследования. Методология исследования базируется на комплексном изучении взаимосвязи между свойствами реагента-собирателя, компонентами оборотной воды и минеральной поверхностью шеелита. Методологическая основа включает современные подходы к планированию экспериментов, многофакторный анализ данных и управление технологическими процессами. В работе использовался метод ядерного магнитного резонанса ЯМР в условиях записи спектров в растворе дейтерированного хлороформа (CDCl_3). Для исследования элементного состава образцов использовали метод сканирующей электронной микроскопии. Измерение краевого угла смачивания произведено на экспериментальной установке OCA 15EC, при помощи программы SCA20 Software for OCA and PCA. Математическую обработку данных краевого угла смачивания производили с помощью метода полиномиальной регрессии второго порядка.

Достоверность и обоснованность. Научные положения и результаты исследования верифицированы посредством аналитических зависимостей и экспериментальной проверки в лабораторных и полупромышленных условиях, что обеспечивает высокую степень их достоверности. Достоверность полученных результатов исследования подтверждается использованием аттестованных методов анализа, средств измерений, сертифицированного оборудования и применением апробированными компьютерными программами.

Научная новизна работы.

1. Установлено, что для системы «талловое масло — шеелит» активными компонентами таллового масла в процессе флотационного обогащения кальцийсодержащих вольфрамовых минералов и после пропарки являются

полиненасыщенные жирные кислоты, формирующие труднорастворимые комплексные соединения на поверхности минерала; вклад смоляных кислот в сорбцию не превышает 5 %.

2. Впервые определены пороговые значения концентрации силикатов и карбонатных ионов, лимитирующие эффективность флотации вольфрамсодержащих минералов в условиях замкнутого водооборота, а также выявлен стабилизирующий эффект карбонатного фона на адсорбцию реагента-собираателя.

3. Разработаны и верифицированы регрессионные зависимости второго порядка, между ионным составом оборотных вод и величиной краевого угла смачивания, определяющего эффективность флотации. Показана эффективность предварительного кондиционирования воды для восстановления адсорбции собирателя и образования устойчивых флотокомплексов.

Практическая значимость

Разработанная методика кондиционирования оборотной воды обеспечивает снижение концентраций карбонатов и силикатов в рециркулирующей воде, что повышает устойчивость флотационного процесса и уменьшает колебания извлечения целевого компонента. Экспериментально обосновано применение таллового масла определенного состава в качестве реагента собирателя, что представляет технологическую альтернативу олеиновой кислоте и позволяет повысить извлечение вольфрама при сопоставимых расходах реагента. Предложенный режим водоподготовки обеспечивает сокращение потребления свежей воды при внедрении замкнутого водооборота, что снижает операционные затраты.

Эффективность предложенных решений подтверждена успешными лабораторными и полупромышленными испытаниями. При флотационном обогащении по оптимизированной технологии на кондиционированной воде извлечение триоксида вольфрама (WO_3) достигает 82,2 %, что практически в 5 раз больше результатов без кондиционирования оборотной воды. Выход концентрата составляет 0,902 % с содержанием WO_3 39,6 %.

По результатам полупромышленных испытаний извлечение WO_3 составило 80,65 % при содержании в шеелитовом флотационном концентрате составило 32,4 %, при выходе 0,73 %. Полученный результат подтверждает технологическую реализуемость методики кондиционирования оборотной воды. На основе полученных данных разработан технологический регламент и выполнен расчет технико-экономических показателей оптимизированной технологии обогащения, который свидетельствует о целесообразности вложений для внедрения оптимизированной технологии обогащения кальцийсодержащей вольфрамовой руды и разработанной методики кондиционирования оборотной воды. Условный срок окупаемости составляет 2,02 года.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, осуществлении обзора и анализа патентной и научно-технической литературы, выполнении комплекса лабораторных работ и полупромышленных испытаний, исследований влияния условий флотационного процесса на взаимодействие реагента-собираателя с минеральной поверхностью, анализе, обобщении и подготовке материалов к публикации, интерпретации данных математической обработки результатов исследований в области различных концентраций примесей с учетом изменения краевого угла смачивания.

Положения, выносимые на защиту

1. Наличие полиненасыщенных жирных кислот в составе таллового масла обеспечивает образование труднорастворимых комплексных соединений реагента на поверхности вольфрамсодержащих минералов.

2. Мешающие примеси в оборотной воде определяют необходимость разработки способов ее кондиционирования в процессе реализации технологии обогащения кальцийсодержащей вольфрамовой руды. Кондиционирование оборотной воды посредством последовательного введения комплекса реагентов обеспечивает эффективность переработки шеелитовой руды в условиях замкнутого водооборота.

3. Эффективность разработанного метода кондиционирования подтверждена результатами измерения краевого угла смачивания минеральной поверхности, лабораторными исследованиями и полупромышленными испытаниями с предоставлением технологического регламента и расчета технико-экономических показателей.

Апробация работы

Все результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на Междунар. конф. «Плаксинские чтения – 2022» (г. Владивосток 4-7 октября 2022 г.); V научно-техн. совещании «Недра Сибири – 2022»; XXVIII Междунар. научно-техн. конф., проводимой в рамках XXI Уральской горнопромышленной декады (г. Екатеринбург 6-7 апреля 2023 г.); XXIII Всероссийской научно-практ. конф. Игошинские чтения – 2023 (г. Иркутск 30 ноября – 1 декабря 2023 г.); XXIX Междунар. научно-техн. конф., проводимой в рамках XXI Уральской горнопромышленной декады. (г. Екатеринбург 4-5 апреля 2024 г.); Междунар. конф. «Плаксинские чтения – 2024» (г. Апатиты 23-27 сентября 2024 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 работ, из них 3 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 102 источника, и 8 приложений. Диссертация изложена на 151 странице, содержит 34 рисунка и 43 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели работы, ее актуальность, научная новизна и практическая значимость.

В главе 1 приведен обзор и анализ состояния минеральной базы, перспективности использования таллового масла в качестве альтернативы олеиновой кислоте и проблемы оборотного водоснабжения на обогатительных фабриках.

В главе 2 приведена краткая характеристика Тырныаузского месторождения, включающая основные сведения, вещественный состав и описание ранних технологий обогащения руды.

В главе 3 приведены исследования по флотационному обогащению руды Тырныаузского месторождения. Выполненные лабораторные опыты направлены на исследование процессов флотационного обогащения с целью оптимизации технологии переработки руды.

На скорректированном режиме выполнен опыт в замкнутом цикле с применением режима сгущения хвостов, и забора осветленной воды в процесс.

Извлечение триоксида вольфрама в концентрат составило 29,57 % при выходе концентрата 0,97 % и содержания в нем 13,7 %. Извлечение молибдена в

молибденовый концентрат составило 45,25 % при выходе концентрата 0,09 % и содержании в нем 36,1 %. Полученные результаты говорят о негативном влиянии замкнутого водооборота на шеелитовый цикл флотационного обогащения и являются основанием для поиска пути решения данной проблемы. Однако, негативного влияния условий замкнутого водооборота на молибденовую флотацию выявлено не было. В связи с чем дальнейшие исследования были сосредоточены на процессах, оказывающих влияние преимущественно на флотацию вольфрамсодержащих минералов.

В главе 4 произведено комплексное изучение взаимосвязи между свойствами реагента-собирающего таллового масла, компонентами оборотной воды и минеральной поверхностью кальцийсодержащих вольфрамсодержащих минералов.

Для обогащения шеелитовой руды предлагается использовать талловое масло в качестве собирателя. Оно выгодно отличается экономичностью, селективностью и устойчивостью к изменениям условий, а также экологической безопасностью.

В главе представлены данные по изучению состава различных сортов таллового масла с помощью метода ЯМР и определен вид сорбции между минеральной поверхностью и реагентом-собирающим. Изучено соленакопление в оборотной воде, выделены основные препятствующие примеси. На основе полученных данных с помощью трехэтапного эксперимента определены предельные концентрации этих примесей. Представлены данные исследования, направленные на изучение краевого угла смачивания в условиях открытого цикла, замкнутого цикла, с накоплением основных препятствующих примесей и на кондиционной воде. Описана зависимость краевого угла смачивания от времени контакта минеральной поверхности с реагентом собирателем с помощью полиномиальной регрессии второй степени. Полученные данные показали, что метод кондиционирования обладает достаточной точностью и эффективностью для решения поставленных задач.

В главе 5 представлены данные полупромышленных испытаний (ППИ) технологии флотационного обогащения в замкнутом цикле. Содержание триоксида вольфрама составило 32,4 % при выходе 0,73 % и извлечении на уровне 80,65 %, что сопоставимо с результатами, полученными в лабораторных условиях. На основе полученных данных при проведении ППИ разработан технологический регламент и произведен технико-экономический расчет.

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в процессе выполнения диссертационной работы.

Первое защищаемое положение. *Наличие полиненасыщенных жирных кислот в составе таллового масла обеспечивает образование труднорастворимых комплексных соединений реагента на поверхности вольфрамсодержащих минералов.*

Литературные источники свидетельствуют о том, что состав талловых масел существенно зависит от вида древесного сырья и условий его технологической обработки. Природная вариабельность состава таллового масла приводит к нестабильности флотационных показателей и усложняет поддержание оптимального реагентного режима. В связи с чем возникает необходимость перехода от использования таллового масла с непостоянными характеристиками к применению его с строго определенным, стандартизированным составом, обеспечивающего

предсказуемые технологические результаты. Методом ЯМР определены основные группы компонентов, нескольких образцов таллового масла в дейтерированном хлороформе. Талловые масла состоят из жирных кислот (предельных и непредельных), смоляных кислот и нейтральных веществ. Предельные кислоты представлены преимущественно стеариновой и пальминовой, непредельные – олеиновой, линолевой и линоленовой; в смоляных кислотах доминирует смесь абиетиновой и дегидроабиетиновой кислот.

Для исследований с целью идентификации компонентов таллового масла при контакте с поверхностью кальцийсодержащего вольфрамового минерала использовалось сырое талловое масло производства СЦКК (Селенгинск). Используемый образец таллового масла состоит из жирных кислот (предельных 40 % и непредельных 50 %), смоляных кислот 5 % и нейтральных компонентов – стеринов 5 %. Выбор обоснован результатами ранних флотационных исследований, показавших его перспективность для повышения эффективности обогащения.

В условиях модельного опыта шеелитовая фракция подвергалась перемешиванию в предварительно приготовленном растворе дистиллированной воды с добавлением 5 % раствора таллового масла. В процессе интенсивного перемешивания образовывалась устойчивая пена, верхний слой отбирали, высушивали и растворяли в дейтерированной воде. Водный раствор фильтровали от оставшейся шеелитовой фракции, которая затем промывалась дистиллированной водой, сушилась и замачивалась в хлороформе.

Спектр ЯМР ^1H 5% раствора омыленного таллового масла в воде (рис. 1а) показывает характерные протонные сигналы, связанные с ненасыщенными и полиненасыщенными жирными кислотами (сигналы при двойной связи $-\text{CH}=\text{CH}-$), метиленовыми группами в α -положении при карбоксиле (2.6-2.4 м.д.), в β -положении (1.7-1.6 м.д.), метиленами, соседними с алленовыми фрагментами (2.4-2.3 м.д.; 2.7-2.6 м.д.), длинными цепями $(-\text{CH}_2)_n$ (1.4-0.9 м.д.) и метильными группами (0.9-0.7 м.д.). Сигнал растворителя наблюдается при 4.6 м.д.

Для проверки соотношения насыщенных и ненасыщенных кислот записан спектр ЯМР ^{13}C этого раствора (рис. 1б); присутствие сигналов в области 130-127 м.д. подтверждает наличие ненасыщенных и полиненасыщенных кислот.

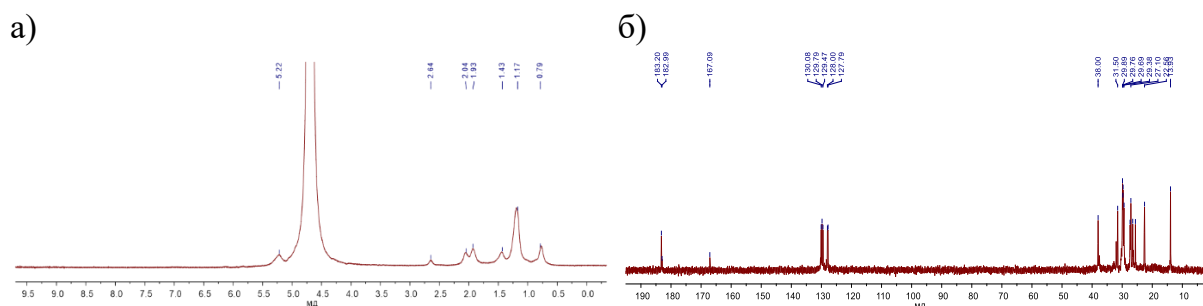


Рисунок 1 – Спектры ЯМР 5 % раствора омыленного таллового масла в H_2O а) ^1H б) ^{13}C

Сравнение спектра ЯМР ^1H водного раствора после флотации (рис. 2) с исходным 5 % раствором показывает изменение интегральных интенсивностей сигналов, в частности уменьшение интенсивности сигнала около 2.5 м.д., что указывает на уменьшение концентрации полиненасыщенных кислот в растворе и свидетельствует о возможном их удержании на минеральной поверхности.

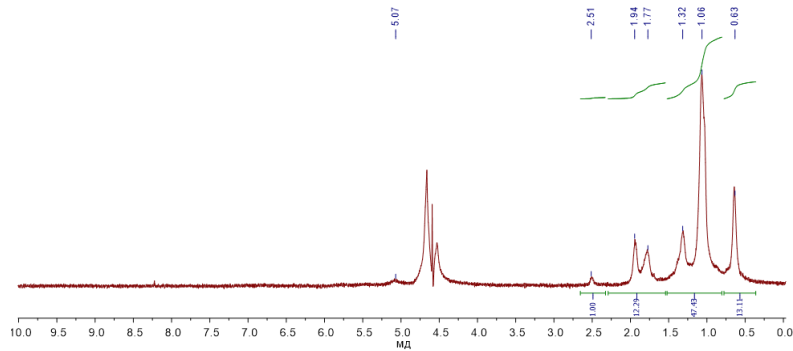


Рисунок 2 – Спектр ЯМР ^1H раствора омыленного таллового масла в H_2O после флотации (сигнал растворителя подавлен)

Органическая фракция, смытая с минерала и исследованная в хлороформе (рис. 3), содержит сигнал при 3.67 м.д., относящийся к метиленам в α -положении при карбоксиле ($-\text{CH}_2-\text{COO}-$). Сдвиг в более слабое поле объясняется перераспределением заряда при контакте с поверхностью. Наличие сигналов при 5.36; 4.34; 4.20 м.д. подтверждает присутствие ненасыщенных жирных кислот, доля которых в смытой фракции оценивается как незначительная – порядка 5 %.

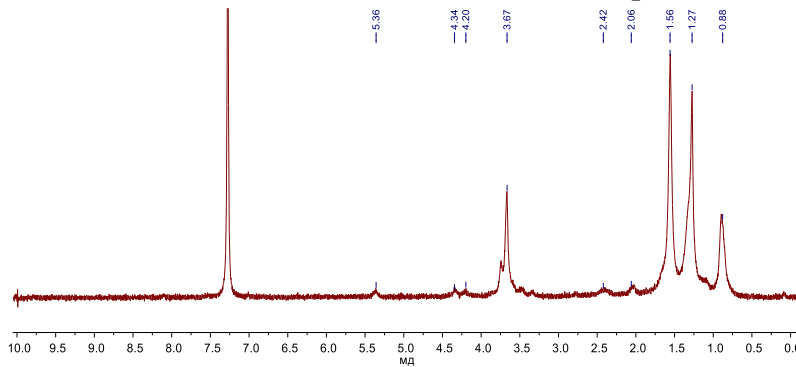


Рисунок 3 – Спектр ЯМР ^1H органической фракции, смытой с минерала (сигнал растворителя CHCl_3 7.27)

Сравнение спектров водного раствора после флотации и органической фракции, снятой с минерала, позволяет предположить, что часть полиненасыщенных кислот закрепилась на поверхности в результате образования химических связей на границе раздела фаз. Хемосорбция анионов и катионов эффективнее при образовании труднорастворимых или комплексных соединений с ионами кристаллической решетки минерала.

Для воспроизведения полной технологии обогащения черновых вольфрамовых концентратов выполнен модельный процесс пропарки по методу Петрова. Процесс осуществляли в среде жидкого стекла при плотности обрабатываемого материала 60 % и температуре 80 °С в течении 45 мин.

Спектр ЯМР ^1H органической фракции, снятой с концентрата после пропарки (рис. 4), показывает появление нового сигнала при 3.57 м.д., ранее не наблюдавшегося в омыленном талловом масле. Это свидетельствует о химической модификации адсорбированных органических кислот, вероятно вследствие автоокисления при экстракции, что может приводить к частичному разрушению ранее образованных хемосвязей.

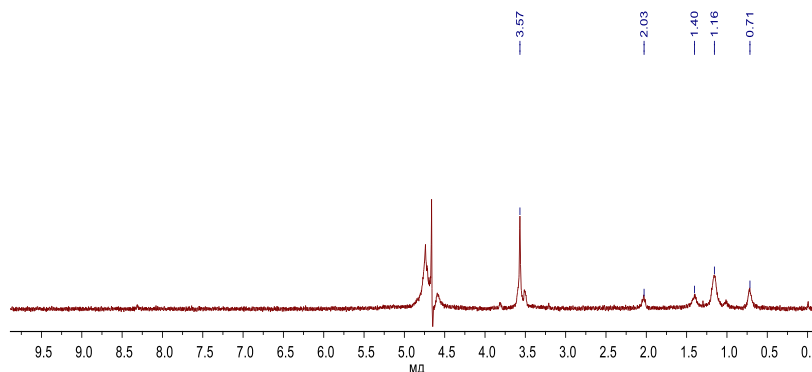


Рисунок 4 – Спектр ЯМР ^1H органической фракции, снятой с концентрата после пропарки

Сканирующая электронная микроскопия с блоком элементного анализа показала, что исходная шеелитовая фракция имеет однородный размер около 50 мкм с редкими включениями до 200 мкм (рис. 5). После модельного флотационного опыта полученный концентрат демонстрирует заметное изменение структуры поверхности частиц (рис. 6). Элементный анализ фиксирует увеличение доли углерода на поверхности концентрата с 1,98 % до 2,1-2,3 %, что указывает на наличие органических компонентов на поверхности частиц. Увеличение углеродного покрытия и наблюдаемое сглаживание шероховатостей поверхности согласуются с формированием гидрофобной пленки, в состав которой входят полиненасыщенные кислоты таллового масла; вероятно, эти компоненты закрепились на поверхности преимущественно хемосорбционно.

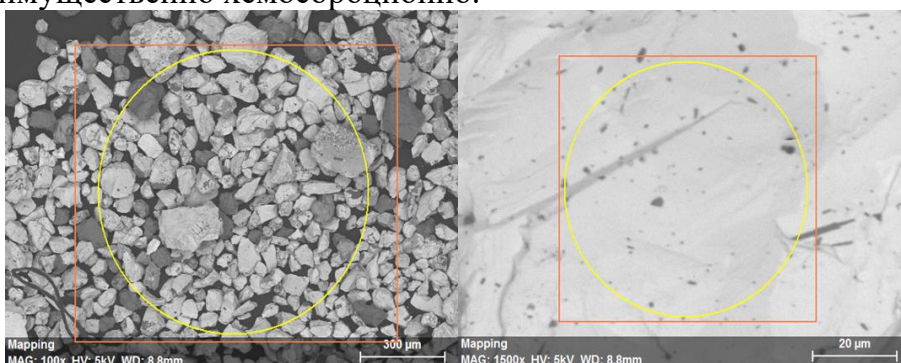


Рисунок 5 – Шеелитовая фракция до модельного опыта

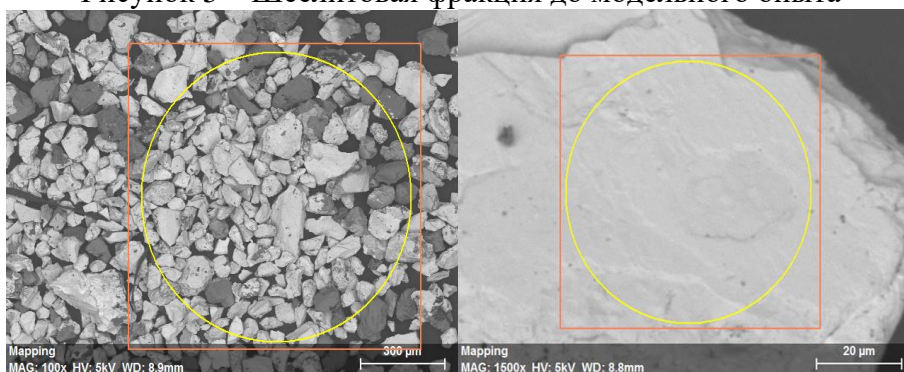


Рисунок 6 – Концентрат, полученный после модельного опыта

Проведенные исследования подтвердили, что омыленное талловое масло обладает способностью селективно взаимодействовать с поверхностью кальций-содержащих вольфрамовых минералов, за счет хемосорбции полиненасыщенных

кислот. Это взаимодействие приводит к формированию на поверхности минеральных частиц гидрофобной органической пленки и повышению содержания углерода на поверхности концентрата. Пропарка по методу Петрова вызывает частичную химическую модификацию адсорбированных кислот, что позволяет управлять степенью их закрепления и, соответственно, регулировать свойства получаемого концентрата.

Второе защищаемое положение. *Мешающие примеси в оборотной воде определяют необходимость разработки способов ее кондиционирования в процессе реализации технологии обогащения кальцийсодержащей вольфрамовой руды. Кондиционирование оборотной воды посредством последовательного введения комплекса реагентов обеспечивает эффективность переработки шеелитовой руды в условиях замкнутого водооборота.*

Экспериментальные исследования, проведенные как в открытом, так и в замкнутом цикле на руде Тырнаузского месторождения с содержанием триоксида вольфрама на уровне 0,41 %, указывают на необходимость корректировки технологии обогащения для достижения показателей флотации, сопоставимых с ранее разработанными технологическими решениями. Результаты опытов по технологии 2019 г. показали повышенное содержание ценных компонентов в хвостах контрольной флотации и дофлотации. Отмечается снижение выхода и извлечения шеелитового концентрата, что говорит об отрицательном влиянии замкнутого цикла на процесс шеелитовой флотации. Полученные результаты явились основанием для поиска и разработки оптимальных параметров флотации.

Перед проведением основных исследований была выполнена корректировка реагентного режима, направленная на стабилизацию технологических результатов. В частности, кальцинированная сода была заменена на бикарбонат натрия, способствующий более плавному и контролируемому регулированию pH среды. Снижен расход жидкого стекла в основную молибденовую флотацию до 200 г/т, обеспечивающий сопоставимые результаты. Также изменения коснулись пенообразователя молибденовой флотации, применяемый ранее дорогостоящий реагент-пенообразователь МИБК был заменен на сосновое масло при сохранении расхода. Указанные изменения носили вспомогательный характер и не являлись предметом анализа в рамках настоящей работы.

С целью изучения влияния реагента-собирающего на флотацию вольфрамсодержащих минералов исследованы пять жирнокислотных собирателей, включая рекомендованный олеат натрия. Полученные результаты флотации обращают внимание на возможность применения таллового масла, как альтернативы олеату натрия. При равном содержании в питании флотации (0,41% WO_3) потери с хвостами флотации при применении таллового масла составили 5,91 % при содержании WO_3 0,03 % против 19,84 % потерь и содержании 0,09 % при применении олеата натрия, что связано с увеличением выхода черного концентрата. Следующие серии опытов проводили на обоих реагентах. При определении расхода реагента-собирающего таллового масла параллельно с олеатом натрия, результаты показали необходимость применения таллового масла с расходом (100 г/т). При несколько большем содержании триоксида вольфрама (по балансу) в питании флотации при проведении опытов с применением таллового масла, отмечается значительно меньшее содержание его в хвостах флотации. Опыты с жирнокислотными

собираемыми при различных температурах указывают на возможность применения собирателя – таллового масла без потерь извлечения на основных операциях, при этом колебание температуры пульпы флотации не оказывало значительного негативного влияния.

По итогам корректировки основных операций шеелитового цикла были проведены исследования, направленные на определение оптимальных расходов жидкого стекла в последующие операции. На основании полученных результатов расходы жидкого стекла остаются без изменений, так как они обеспечивают извлечение ценного компонента на стабильном уровне. Также были проведены исследования по определению оптимальной температуры пропарки шеелитового концентрата. Полученные результаты показывают прямую зависимость влияния температуры пропарки на качество концентрата и его выход. С повышением температуры повышается содержание триоксида вольфрама в концентрате, при этом снижается выход и извлечение. Оптимальной температурой, обеспечивающей извлечение и содержание на уровне технологических решений 2019 г., является 80 °С. В лабораторных условиях при температуре пропарки 80 °С достигнуто извлечение 82,15% при содержании 38,5 % и выходе 0,926 % при перечистке концентрата после пропарки четыре раза, так как две перечистки не обеспечивали необходимые показатели по качеству получаемого концентрата.

На разработанном реагентном режиме проведено исследование в замкнутом цикле. Реагентный режим представлен в табл. 1, результаты замкнутого цикла приведены в табл. 2.

Таблица 1 – Реагентный режим флотации с корректировками

Точки подачи	Расход, г/т						Температура, °С
	NaHCO ₃	Жидкое стекло	NaOH	TM	CaO	H ₂ SO ₄	
Основная WO ₃ флотация	1200	400	200	75			
Контрольная WO ₃ флотация				25			
1 WO ₃ перечистка		100					
Пропарка черного WO ₃ концентрата		4000					80
Дофлотация	500			5			
Сгущение хвостов					2800	1200	

Таблица 2 – Баланс металлов в замкнутом цикле

Наименование	Выход, %	Содержание, WO ₃ %	Извлечение, WO ₃ %
Mo концентрат (5)	0,09	3,3	0,63
WO ₃ концентрат (5)	0,97	13,7	29,57
Хвосты дофлотации (5)	14,46	1,75	56,57
Хвосты контрольной флотации (5)	84,49	0,07	13,23
Итого	100,00	0,45	100,00

В результате флотационного обогащения с имитацией замкнутого цикла извлечение триоксида вольфрама в концентрат составило 29,57 % при выходе концентрата 0,97 % и содержании в нем 13,7 %.

Полученные результаты говорят о негативном влиянии замкнутого водооборота на шеелитовый цикл флотационного обогащения и являются основанием для поиска пути решения данной проблемы.

Для накопления статистики по соленакоплению в водообороте проведено флотационное обогащение в непрерывном режиме как в открытом, так и в замкнутом цикле водооборота, для определения характера образующегося солевого фона и ориентировочных концентраций основных ионов, которые важны для выявления возможной сорбционной активности различной природы рудной массы по отношению к компонентам вносимых неорганических реагентов. С целью получения необходимой информации было проведено опробование неудавшегося замкнутого цикла с многократной корректировкой реагентного режима сгущения и осветления хвостов флотации. Пробы слива сгущения отбирались для контроля состава оборотной воды. Результаты анализов по компонентам, оказывающим негативное влияние на процесс обогащения в замкнутом цикле представлены в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 3 – Влияние соленакопления в циклах водооборота на извлечение ценного компонента

Компонент (ион)	Цикл						
	5	6	7	8	9	10	11
	Концентрация, мг/л						
Извлечение WO ₃ , %	79,33	86,78	70,09	62,35	76,52	81,10	74,25
Ca	159,6	235,3	259,2	342,9	10,4	5,1	6,3
CO ₃ (расчет.), мг/л	150	132	135	186	474	432	470
Na	156,4	143,1	213,5	258,6	237	262	295
Si	73	68,4	67	80,9	134	146	160
Cl	337	398	543	692	49,7	44	38,3

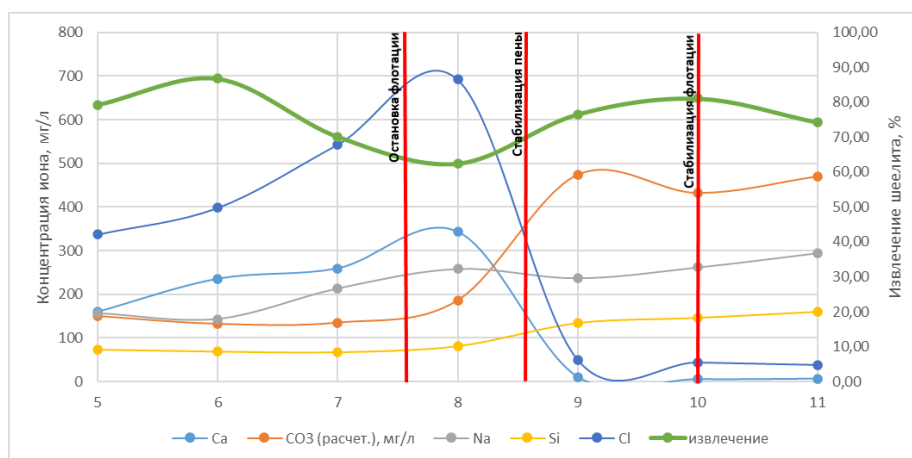


Рисунок 7 – Зависимость извлечения триоксида вольфрама от концентраций ионов оказывающим негативно влияние на процесс обогащения в замкнутом цикле

В открытом цикле сфлотировано 4 навески, слив сгущения с полученных опытов опробован на анализ. Пятый цикл «замыкал» схему оборотной воды с учетом введения в него хлорида кальция в качестве коагулянта. Во время восьмого цикла подача хлорида кальция остановлена. Для обновления оборотной воды часть была выведена из процесса. На финальном этапе (11 цикл) подавался органический коагулянт PDM-40Z (ООО «Флотент»). За период опробования были выделены следующие условные зоны функционирования основного процесса, показатели качества пенообразования фиксировались визуально:

7-8 циклы – остановка флотации, плохое пенообразование, чистый слив сгустителя;

9 цикл – восстановление пенообразования, некачественная флотация всех компонентов, мутная оборотная вода;

11 цикл – восстановление показателей флотации, требуемое извлечение и качество концентрата не достигается, чистый слив сгустителя.

В первой зоне проводилась подача хлорида кальция в качестве коагулянта, что отразилось на содержании ионов кальция и хлоридов в оборотных водах. Также наблюдается некоторое снижение содержания кремния и карбонатов за счет их вывода в виде нерастворимых соединений с кальцием. Несмотря на получение относительного чистого слива хвостового сгустителя, наблюдалась остановка флотации и пенообразования, что позволяет сделать вывод о потенциальном влиянии кальция или хлоридов на основной процесс. Вероятно, из реагентов, применяемых на флотации, негативное воздействие оказывает кальций, способный связывать мыла в нерастворимые осадки и подавлять пенообразование. Хлориды являются индифферентным ионом для этого типа флотореагентов.

После прекращения подачи хлорида кальция и вывода Ca^{2+} из оборотной воды отмечается стабилизация пенообразования. Предельная концентрация кальция, не оказывающая влияния на процесс флотации, составляет 20 мг/л.

Кремний в виде жидкого стекла, в значительном количестве подается в основной процесс, что обуславливает его присутствие в оборотной воде. После завершения дозирования CaCl_2 , несмотря на восстановление пенообразования, значительных положительных изменений показателей флотации не было зафиксировано, что свидетельствует о влиянии кремния. Подтверждением этого вывода является улучшение показателей флотации при снижении концентрации силикатов на заключительном этапе проведения испытаний.

Аналогичный вывод может быть сделан для карбонатов, которые также вносятся с реагентами на основном процессе.

Выраженной связи между концентрацией натрия и эффектами на флотации не прослеживается. Есть вероятность, что этот ион является индифферентной примесью.

За счет силиката натрия, гидроксида натрия и гидрокарбоната натрия вода обогащается кремнием, ионами натрия и карбонатами. Зафиксированные изменения солевого фона позволяют сделать вывод об отсутствии выраженной сорбционной активности руды по отношению к этим веществам.

Изменения концентрации компонентов солевого фона оборотной воды, представленных в табл. 3, позволяют сделать вывод, что основными растворенными примесями, оказывающими потенциальное влияние на флотацию, являются: карбонаты, кальций, хлориды и силикаты. Содержание остальных 19 компонентов при проведении опробования и во время вносимых корректировок в основной процесс находилось на относительно стабильном уровне, что свидетельствует об отсутствии их влияния на технологию обогащения.

Накопление растворенных примесей в оборотной воде при замкнутом водообороте (в частности, карбонатной и силикатной составляющих, а также ионов кальция, натрия и хлорид-ионов) снижает пенообразуемость и флотационную активность при обогащении кальцийсодержащих вольфрамowych руд, что приводит к уменьшению выхода и извлечения ценного компонента, что обосновывает необходимость кондиционирования оборотной воды.

Флотация шеелитовых руд осуществляется в два этапа: получение черного шеелитового концентрата и доводка черного концентрата до кондиционного. Для доводки черного концентрата применяют классический процесс Петрова – пропарка черного шеелитового концентрата с добавлением жидкого стекла (4 кг/т) при температуре 80 °С. При данной обработке ранее применяемый собиратель десорбируется с поверхности частиц кальциевых минералов, разубоживающих концентрат, и их флотация практически полностью депрессируется на стадиях доводки. При этом оборотные воды флотационного процесса представляют собой весьма устойчивую дисперсионную систему, трудно поддающуюся осветлению, что усложняет применение водооборота в схемах флотации. Это обусловлено накоплением в оборотной воде основных препятствующих примесей – карбонатов и силикатов, концентрации которых в оборотной воде достигают Ca 150-350 мг/л, Si/SiO_3^{2-} – 70-150/150-350 мг/л, которые ухудшают процесс осветления оборотных растворов, что в дальнейшем приводит к ухудшению процесса флотационного обогащения.

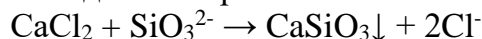
Для подготовки оборотной воды по ранее предложенным технологическим решениям 2019 г. рекомендован способ сгущения хвостовой пульпы известью (2,2 кг/т) и нейтрализацию полученного слива серной кислотой (до pH 8,5), с последующим забором его в процесс обогащения.

Одним из ключевых недостатков данного способа является использование серной кислоты в качестве подкислителя, что приводит к разложению карбоната кальция с образованием гипса. Гипс, будучи малорастворимым соединением, выпадает в осадок, что приводит к засорению оборудования и затрудняет нормальную циркуляцию пульпы, к снижению эффективности флотационного процесса, сказывающегося на качестве получаемых продуктов, к потере ценных компонентов. Дополнительным ограничением является необходимость в длительном времени отстаивания нейтрализованного слива до 72 ч. Это не только замедляет производственный цикл, но и требует значительных площадей для размещения отстойников. Стоит отметить, что при использовании извести возрастает риск снижения флотационной активности жирнокислотных собирателей.

Для обеспечения целевого извлечения ценного компонента на требуемом уровне и стабильности процесса в условиях замкнутого водооборота разработан новый способ кондиционирования воды заключающийся в предварительной кальций хлоридной обработке оборотной воды с отделением осадка и щелочно-содовую обработку на финальной стадии.

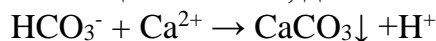
При кондиционировании оборотной воды значения концентраций силикатов и кальция составляют 60 и 20 мг/л, соответственно, что обусловлено результатами определения предельных концентраций, при которых обогащение руды осуществляется на необходимом уровне. Предельные концентрации определены с помощью трехэтапного эксперимента, включающего на первом и втором этапах поиск оптимальной области концентраций методом математического планирования. Для построения эмпирического уравнения отклика был использован ортогональный центрально-композитный план второго порядка. Третий этап включал определение предельных концентраций примесей.

Кондиционирование оборотных вод проходит в два этапа. На первом этапе хвостовая пульпа обрабатывается хлоридом кальция (CaCl_2) для удаления силикатов, концентрация которых не должна превышать 60 мг/л:

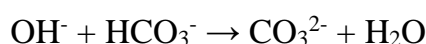


Обработанные реагентом хвосты поступают на сгущение с последующей корректировкой pH среды NaOH до 6,8-7,2. Дальнейшая обработка проводится на осветленном сливе.

На втором этапе воду обрабатывают гидрокарбонатом натрия для удаления остаточного кальция, не превышающего 20 мг/л, до значения pH среды 8,5-9:



Для интенсификации этой реакции добавляется NaOH , при этом часть гидрокарбонатов переходит в карбонаты, а также купируется процесс закисления воды:



Обработка воды осуществляется по схеме, представленной на рис. 8.

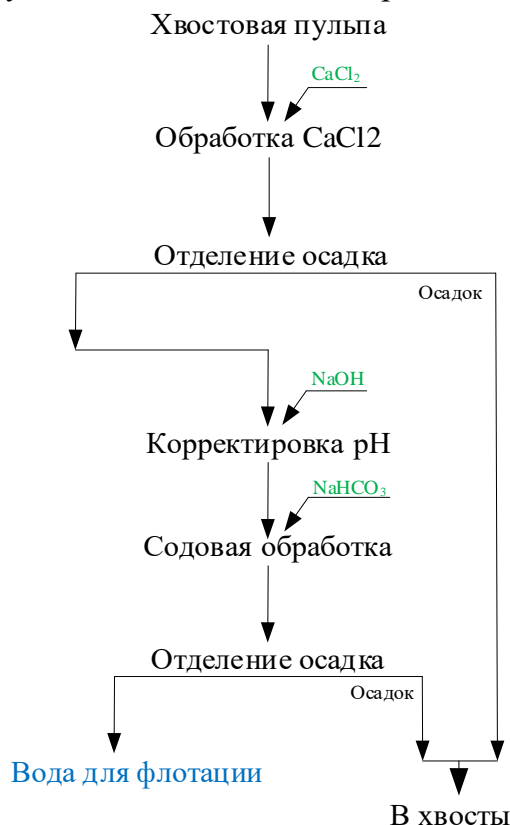


Рисунок 8 – Схема подготовки оборотной воды для флотационного процесса

Третье защищаемое положение. Эффективность разработанного метода кондиционирования подтверждена результатами измерения краевого угла смачивания минеральной поверхности, лабораторными исследованиями и полупромышленными испытаниями с предоставлением технологического регламента и расчета технико-экономических показателей.

Для подтверждения эффективности данного метода кондиционирования проведены исследования, направленные на изучение влияния ионного состава воды на изменение краевого угла смачивания минеральной поверхности при флотации и количественно оценена флотационная активность через изменение потери

свободной поверхностной энергии при прилипании пузырька к частице $\Delta F' = \frac{\sigma_{г-ж}}{2} (1 - \cos\theta)$ в трех режимах: открытом водном цикле, замкнутом водном цикле с накоплением основных препятствующих примесей и в замкнутом цикле с предварительным кондиционированием оборотной воды предлагаемым способом. Размерный эффект смачивания определялся при обработке минеральной поверхности дистиллированной водой 0,002, 0,004, 0,006 и 0,008 % омыленными растворами таллового масла. Полученные результаты представлены в виде графиков на рис. 9.

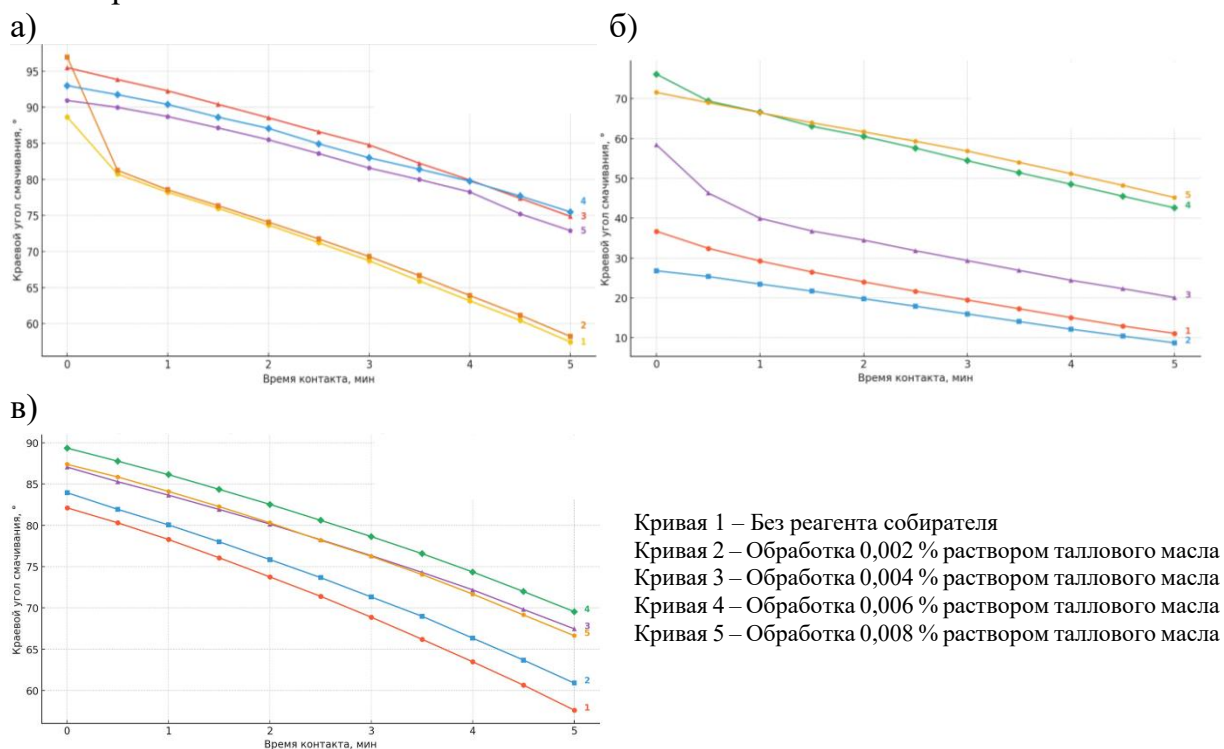


Рисунок 9 – Зависимость краевого угла смачивания минеральной поверхности, обработанной раствором собирателя от времени контакта а) для открытого цикла с использованием дистиллированной воды б) с каплей, искусственно обогащенной карбонатами и силикатами в) с кондиционированной каплей воды

Полученные данные в открытом цикле при контакте необработанной минеральной поверхности с дистиллированной водой стремительно уменьшается с 88,65 до 57,47 град. (рис. 9а, кривая 1), что указывает на хорошее смачивание минерала дистиллированной водой и незначительную возможность прилипания минерала к пузырьку воздуха в процессе флотационного обогащения.

При обработке минеральной поверхности различными концентрациями омыленного таллового масла полученные результаты показывают более плавное снижение краевого угла смачивания с увеличением времени. В начальный момент времени краевой угол при обработке растворами таллового масла составляет от 90,93 до 96,95 град., по мере увеличения времени до 5 мин, краевой угол постепенно снижается от 75,48 до 72,37 град. (рис. 9а, кривые 2-5). С увеличением концентрации таллового масла краевой угол смачивания снижается быстрее, это указывает на менее эффективную работу собирателя при высоких концентрациях.

При контакте необработанной минеральной поверхности с каплей, искусственно обогащенной препятствующими примесями, величина краевого угла

смачивания с течением времени стремительно снижается, это указывает на полное смачивание минеральной поверхности. Обработанная реагентом-собирателем минеральная поверхность ведет себя схоже с необработанной при низких концентрациях реагента-собираателя, при более высоких его концентрациях значение размерного эффекта смачивания с течением времени изменяется от 73,83 до 43,87 град. (рис. 9б, кривые 4-5 по среднему значению).

При контакте необработанной минеральной поверхности с кондиционированной каплей воды величина краевого угла смачивания ниже, чем у обработанной минеральной поверхности реагентами-собираателями различной концентрации. Скорость уменьшения краевого угла выше при более низких концентрациях таллового масла. Это говорит о том, что талловое масло очевидно замедляет процесс взаимодействия реагента собирателя с минеральной поверхностью.

Для количественной оценки флотационной активности учитываем, что концентрация реагента в процессе флотации составляет 0,004 %. Убыль свободной поверхностной энергии системы после прилипания пузырька к твердой поверхности на единицу вновь образованной поверхности раздела твердое тело-газ (пузырек) (табл. 4) по среднему значению в открытом цикле при краевом угле смачивания 74,87-95,48 град. равна 23,93-36,38 эрг/см². В замкнутом цикле данная величина существенно снижается из-за влияния примесей, снижающих гидрофобность поверхности и уменьшающих силу адгезии между пузырьком и частицей минерала при краевом угле смачивания в среднем 20,7-58,4 град. и составляет 2,19-18,19 эрг/см². В замкнутом цикле с кондиционированием оборотной воды флотационная активность при краевом угле смачивания 67,47-87,05 град. составила 23,93-30,64 эрг/см².

Таблица 4 – Зависимости флотационной активности $\Delta F'$ от краевого угла смачивания θ°

Краевой угол смачивания θ , град	0,5	1	2	3	4	5	10	20	30
$\Delta F' = \frac{\sigma_{г-ж}}{2} (1 - \cos\theta)$	0,0014	0,007	0,022	0,051	0,087	0,138	0,553	2,19	4,88
Краевой угол смачивания θ , град	40	50	60	70	80	90	100	105	
$\Delta F' = \frac{\sigma_{г-ж}}{2} (1 - \cos\theta)$	8,51	12,96	18,19	23,93	30,64	36,38	42,69	45,8	

Проведенные экспериментальные исследования показали, что характер изменения краевого угла смачивания минеральной поверхности существенно зависит от условий водооборота и концентрации используемого реагента-собираателя. Введение кондиционирования оборотной воды перед взаимодействием с минеральной поверхностью показало высокую эффективность, что выражается в практически полном восстановлении гидрофобных свойств поверхности шеелитового минерала до уровня, сопоставимого с результатами, полученными в открытом цикле.

Полученные данные описаны с помощью метода полиномиальной регрессии второй степени:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (1)$$

где y – зависимая переменная (в данном случае – краевой угол смачивания, град);
 x – независимая переменная (в данном случае – время контакта, мин);

a,b,c – коэффициенты регрессии, рассчитываемые на основе экспериментальных данных методом наименьших квадратов и отражающие влияние времени на величину краевого угла.

Для каждого условия настоящего исследования и концентрации реагента-собирающего талловое масло рассчитаны коэффициенты регрессионной модели и коэффициенты детерминации каждой модели.

Установлено, что выбранная математическая модель адекватно описывает экспериментальные зависимости, о чем свидетельствуют полученные высокие значения коэффициентов детерминации R^2 (от 0,98 до 1,0). Наиболее точное описание экспериментальных данных было достигнуто в условиях открытого цикла и замкнутого цикла с кондиционированием искусственно обогащенной воды. Это подтверждает воспроизводимость и стабильность полученных результатов, а также возможность использования разработанных моделей в целях прогнозирования и оптимизации технологических параметров флотации.

На основании собранных данных по соленакоплению определены предельные концентрации препятствующих примесей и разработан новый способ кондиционирования оборотной воды для замкнутого цикла. Данный способ опробован в лабораторных и полупромышленных испытаниях с имитацией замкнутого цикла.

В результате лабораторных исследований по флотационному обогащению пробы скарновой руды Тырнаузского месторождения с имитацией замкнутого цикла извлечение триоксида вольфрама составило 82,2 % при выходе концентрата 0,902 % и содержания в нем 39,6 % г/т. Достигнутый уровень извлечения соотносится с рекомендованным технологическим регламентом. Полученные результаты подтверждают ранее проведенные лабораторные исследования, направленные на оптимизацию режима флотационного обогащения.

Разработанная технология кондиционирования оборотной воды принята к полупромышленным испытаниям в непрерывном режиме на скарновой пробе руды исследуемого месторождения. Результаты лабораторных исследований и полупромышленных испытаний в условиях кондиционирования оборотной воды и без представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты лабораторных исследований и полупромышленных испытаний

Условия флотации	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
Открытый цикл (лаборатория)	0,93	38,5	82,45
Замкнутый цикл без кондиционирования (лаборатория)	0,47	13,64	16,55
Замкнутый цикл с кондиционированием (лаборатория)	0,902	39,6	82,2
Замкнутый цикл с кондиционированием (полупромышленные испытания)	0,73	32,4	80,65 (76,82 операционное)

В процессе проведения полупромышленных испытаний по гравитационно-флотационной технологии обогащения произведены гравитационный 53,8/0,13 (содержание, %/выход, %) и флотационный 32,4/0,73 (извлечение 76,82 %) шеелитовые концентраты и молибденовый 34,9/0,042 концентрат, попутно произведен сульфидный 35/0,07 продукт, получение которого обусловлено необходимостью обеспечения качества шеелитовых концентратов. Достигнутый уровень извлечения (80,65 %) и качество полученных концентратов при проведении

полупромышленных испытаний подтверждают результаты лабораторных испытаний. На основе полученных данных разработан технологический регламент, включающий расчет технологии при исходном содержании триоксида вольфрама 0,38 % и производительности ОФ по исходной руде 1500 тыс. т/год (186,12 т/ч). Выход флотационного шеелитового концентрата составит 10950 т/год с содержанием 32,4 % WO_3 , объем товарного вольфрамового концентрата составил 3547,8 т/год. Проведенный технико-экономический анализ показал, что рассматриваемый проект обладает высокой степенью инвестиционной привлекательности и экономически эффективен. Годовой доход от реализации продукции составляет 6384 млн руб., при эксплуатационных расходах 4996 млн руб., что обеспечивает положительный условный чистый денежный поток в размере 1170 млн руб./год. Чистая приведенная стоимость (NPV) при ставке дисконтирования 25 % за 4 года составила 1090 млн руб., что свидетельствует о целесообразности вложений.

Условный срок окупаемости проекта составляет 2,02 года, что характеризует его как быстроокупаемый. Рентабельность производства достигает 20,82 %, что превышает пороговые значения для аналогичных объектов. Себестоимость 1 т. концентратов составляет 315050 руб., что соответствует допустимому уровню в рамках заданных технологических и рыночных условий.

Заключение

В диссертационной работе предложено решение актуальной научно-практической задачи, имеющей важное значение для горноперерабатывающей отрасли – оптимизация технологии флотации кальцийсодержащих вольфрамовых руд с использованием кондиционированной воды в условиях замкнутого водооборота.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана оптимальная технология обогащения кальцийсодержащей вольфрамовой руды в открытом цикле с использованием предложенного реагентособиравателя таллового масла (производства Селенгинского СЦКК), обеспечивающая эффективные показатели содержания и извлечения ценных компонентов.

2. Экспериментально установлено, что применение пропарки по методу Петрова с использованием значительного количества жидкого стекла в процессе флотации оказывает отрицательное влияние на качество оборотной воды и приводит к снижению содержания и извлечения ценных компонентов за счет накопления ионов депрессора, способствующих стабилизации коллоидной взвеси и нарушению реагентного режима флотации.

3. Определен состав реагентособиравателя таллового масла, выявлены его активные компоненты и установлен механизм взаимодействия собирателя с минеральной поверхностью. Полученные данные показали, что наличие полиненасыщенных жирных кислот способствует образованию труднорастворимых комплексных соединений, повышающих селективность флотации.

4. Установлено снижение эффективности флотации при работе в замкнутом цикле, вследствие соленакопления в оборотной воде, а также обоснована необходимость ее кондиционирования.

5. Определены критические концентрации основных мешающих примесей – карбонатов и силикатов (значения концентраций силикатов и кальция составляют 60 и 20 мг/л, соответственно), обеспечивающие сохранение эффективности разработанной схемы.

6. Разработан и обоснован метод кондиционирования оборотной воды с последовательным введением комплекса реагентов, который включает в себя предварительную кальций-хлоридную обработку оборотной воды с отделением осадка, и щелочно-содовую обработку на финальной стадии, что обеспечивает необходимый уровень концентраций карбонатов и силикатов.

7. Подтверждена эффективность метода кондиционирования при исследовании с помощью метода измерения угла контакта (краевой угол смачивания) в открытом цикле, в замкнутом цикле с накоплением солей и в замкнутом цикле на кондиционированной воде.

8. Разработанный метод кондиционирования оборотной воды опробован в лабораторных исследованиях и полупромышленных испытаниях в условиях замкнутого водооборота. Метод обеспечивает извлечение триоксида вольфрама 82,2 %, что практически в 5 раз больше результатов, полученных в замкнутом цикле без кондиционирования оборотной воды. Выход концентрата составил 0,902 % и содержание целевого элемента в нем 39,6 % в лабораторных исследованиях, и 0,73 % при содержании 32,4 % в условиях полупромышленных испытаний. Извлечение же в шеелитовый концентрат составило 80,65 %.

9. Сформирован технологический регламент внедрения и выполнен технико-экономический расчет, подтверждающий рентабельность предлагаемой технологии. Годовой доход от реализации товарной продукции составил 6384 млн. руб., чистая приведенная стоимость при ставке дисконтирования 25 % за 4 года составит 1090 млн. руб., условный срок окупаемости – 2,02 года.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. **Уразова Ю. В.**, Тиунов М. Ю., Чикин А. Ю. Флотационное обогащение вольфрамовых руд в условиях замкнутого водооборота // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2023. – Т. 29. – № 2. – С. 70-78.
2. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Федотов Е.Н., Чикин А.Ю. Изучение механизма взаимодействия жирнокислотных собирателей с поверхностью кальцийсодержащих вольфрамовых минералов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 74-83.
3. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Чикин А.Ю., Войлошников Г.И. Изучение влияния ионного состава пульпы на изменение краевого угла смачивания поверхности шеелита при его флотации в условиях замкнутого водооборота // Обогащение руд. – 2025. – № 3. – С. 25-30.

Другие публикации

4. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Чикин А.Ю. Совершенствование флотационного обогащения вольфрамовых руд // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2022): материалы междунар. конф., Владивосток, 4–7 октября 2022 г. / науч. редакторы: В.А. Чантурия, Т.Н. Матвеева, А.В. Огнев ; сост. Т.В. Чекушина. – Владивосток : Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2022. – С. 289-290.

5. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Чикин А.Ю. Флотационное обогащение вольфрамовых руд в условиях замкнутого водооборота // Развитие горнодобывающей промышленности в современных условиях: состояние, проблемы, решения: материалы V научно-техн. совещания «Недра Сибири – 2022», Иркутск 30 ноября – 1 декабря 2022 г. Иркутск. – 2022. – С. 123-129.
6. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Чикин А.Ю. Совершенствование флотационного обогащения вольфрамовых руд // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVIII Междунар. научно-техн. конф., проводимой в рамках XXI Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06-07 апреля 2023 года / Уральский государственный горный университет; Горно-металлургическая секция РАЕН; ООО «Таилс КО». – Екатеринбург: ООО «Типография ФортДиалог», 2023. – С. 242-246.
7. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Федотов Е.Н., Чикин А.Ю. Флотационное обогащение вольфрамовых руд с использованием замкнутого водооборота // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXIX Междунар. научно-техн. конф., проводимой в рамках XXII Уральской горнопромышленной декады 01-10 апреля 2024 г., Екатеринбург, 04-05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 187-191.
8. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Федотов Е.Н., Чикин А.Ю. Изучение механизма взаимодействия собирателя с поверхностью вольфрамовых минералов // Инновационные процессы обогащения и глубокой переработки редкометаллического и горнохимического сырья и комплексных руд цветных и черных металлов (Плаксинские чтения – 2024), г. Апатиты, 23-27 сентября 2024 г.: материалы междунар. конф. / Отделение наук о Земле Российской академии наук, Научный совет РАН по проблеме обогащения полезных ископаемых [и др.] ; научные редакторы: академик РАН В.А. Чантурия [и др.]. - Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2024. – С 290-292.
9. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Федотов Е.Н., Чикин А.Ю. Исследование механизма взаимодействия поверхности кальцийсодержащего вольфрамового минерала с жирнокислотными собирателями // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: материалы междунар. научно-практ. конф., Екатеринбург, 6-7 ноября 2024. – С.195-199.
10. **Уразова Ю.В.**, Тиунов М.Ю., Федотов Е.Н., Чикин А.Ю. Ресурсы и особенности обогащения вольфрамсодержащих руд // Золотодобыча. – 2025. – № 5. – С. 12-14.

Подписано в печать 16.04.2026. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Зак. 035к.

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