

На правах рукописи

Кузнецов Валентин Вадимович



**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ФЛОТИРУЕМОСТИ МИНЕРАЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД**

Специальность 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Александрова Татьяна Николаевна

Официальные оппоненты:

Чантурия Елена Леонидовна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», кафедра обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, профессор;

Митрофанова Галина Викторовна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Горный институт, лаборатория № 29 флотационных реагентов и комплексных руд, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск.

Защита диссертации состоится 27.02.2024 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета ГУ.5 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 27.12.2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



НИКОЛАЕВА
Надежда Валерьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Ввиду повсеместного сокращения количества месторождений благородных металлов с высоким содержанием ценного компонента и усложнением технологических свойств руды традиционные технологии обогащения все в меньшей степени соответствуют современным запросам по производительности и качеству получаемых концентратов, комплексности использования сырья и экологичности процессов.

Особенно данная проблема актуальна при переработке золотосодержащих руд. Сокращение базы россыпных месторождений золота смещает фокус на необходимость вовлечения в переработку коренных месторождений золота. Однако ключевой проблемой для переработки таких руд остается фактор «упорности» - свойства руд, которые снижают эффективность цианидного выщелачивания золота. Для их переработки требуются разветвленные схемы обогатительных переделов, наряду с применением комбинации методов обогащения с металлургическими операциями.

Особый интерес в этой области представляют руды, где частицы золота тонковкраплены в массив сульфидных минералов. Задача обогатительного передела для таких руд сводится к наиболее эффективной концентрации минералов-носителей золота для их дальнейшей металлургической переработки (автоклавного окисления, обжига).

Степень разработанности темы исследования.

Вопросам переработки золотосодержащих руд посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых, таких как: Плаксин И.Н., Чантурия В.А., Александрова Т.Н., Бочаров В.А., Лодейщиков В.В., Матвеева Т.Н., Меретуков М.А., Полькин С.И., Седельникова Г.В., Федотов К.В., A.J. Lynch, C. O'Connor и другие.

Наиболее универсальным и гибким методом обогащения для таких руд остается флотация, технологии которой могут быть адаптированы под практически любые технологические свойства минералов и требования по готовой продукции. Однако высокая сложность процесса значительно затрудняет прогнозирование эффективности проектируемых решений флотационного

обогащения. Любая вариация реагентного режима или аппаратного оформления, изменение конфигурации предшествующей схемы рудоподготовки, внедрение технологий интенсификации основных обогатительных переделов влияет на эффективность выбранной технологии флотации. В этой связи особенно актуальными становятся вопросы разработки принципов моделирования процессов флотации, базирующихся на обширных исследованиях фундаментальных физико-химических явлений, лежащих в основе флотационной сепарации. Существенный вклад в развитие методологических основ теории флотационных процессов внесли многие отечественные и зарубежные ученые, такие как: Чантурия В.А., Александрова Т.Н., Абрамов А.А., Вигдергауз В.Е., Глембоцкий А.В., Горячев Б.Е., Игнаткина В.А., Каковский И.А., Классен В.И., Кондратьев С.А., Максимов И.И., Мелик-Гайказян В.И., Митрофанов С.И., Митрофанова Г.В., Морозов В.В., Орехова Н.Н., Рябой В.И., Соложенкин П.М., Тихонов О.Н., Шехирев Д.В., Юшина Т.И., D.J. Alexander, J.J. Cilliers, M.C. Fuerstenau, M. Rudolph, A.F. Taggart, J. Yianatos и другие.

Таким образом, обоснование и разработка эффективных технологий флотационной переработки золотосодержащих руд на основании новых методов и подходов к оценке флотируемости рудного сырья является актуальным вопросом, имеющим научную и практическую значимость в современных экономических условиях.

Цель работы. Обоснование и разработка технологических решений, повышающих эффективность флотационной переработки золотосодержащих сульфидных руд на основании комплексирования результатов экспериментальных исследований и результатов имитационного моделирования.

Идея работы. Комплексные параметры флотируемости определяют возможные пути повышения эффективности переработки золотосодержащих руд.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения **следующих задач:**

1. Систематизация и анализ существующих подходов к моделированию флотационных процессов и к оценке флотационной способности минералов;

2. Разработка, теоретическое обоснование и экспериментальная верификация методики определения параметров флотуемости рудного сырья на основании вероятностно-кинетического подхода;

3. Экспериментально-теоретические исследования измельчаемости и флотационного обогащения золотосодержащих сульфидных руд;

4. Имитационное моделирование процесса флотационного обогащения золотосодержащих сульфидных руд с использованием экспериментально полученных параметров флотуемости при изменении реагентного режима и аппаратурного оформления;

5. Экономическая оценка предлагаемых решений по повышению эффективности переработки золотосодержащих сульфидных руд.

Объект исследования. В настоящей работе в качестве объекта исследования выбраны технологические пробы золотосодержащей сульфидной руды месторождения Дальнего Востока Российской Федерации.

Предмет исследования. В настоящей работе в качестве предмета исследования выбраны процессы флотации тонковкрапленных золотосодержащих сульфидных руд.

Методология и методы исследований. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной базе НЦ «Проблем переработки минерального сырья» Горного университета. Анализ исходных проб и продуктов обогащения проводился с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра EDX-7000, фирмы Shimadzu, Япония. В оптических методах исследований использовался оптический микроскоп Zeiss Axio Lab A1. Исследования измельчаемости проводились с применением лабораторной мельницы производства НПК «Механобр-техника», Россия МШЛ-7. Флотационные исследования проводились на пневмомеханических флотомашинах НПК «Механобр-техника», Россия, флотационной пневмомеханической машине Laarmann, Нидерланды. Тесты флотуемости проводились на специализированной флотомашине-тестере JK Batch Flotation Test

Machine, Австралия. Помимо натуральных экспериментов в рамках исследования использовались методы имитационного моделирования и обработки данных с использованием следующего программного обеспечения: программный пакет JK SimFloat, программный пакет анализа изображений DG Analyser 1.5, программный пакет «EMF-Suite» компании «Lawson Labs», объектно-ориентированный язык программирования Python 3.8.

Научная новизна:

1. Предложенная функция распределения компонентов рудного сырья по флотуемости позволяет установить степень неравномерности флотационных свойств для различных классов крупности на основании интерпретации результатов кинетических исследований флотационного обогащения.

2. Обоснован критерий оценки эффективности гидрофобизации K_{ϕ} поверхности сульфидного минерала сульфгидрильными собирателями на основании определения значения компонент свободной энергии поверхности.

3. Предложен и экспериментально обоснован критерий интенсификации процесса измельчения K_{θ} , который позволил обосновать применение перманганата калия для повышения эффективности измельчения.

4. Разработан подход определения значения параметра удельной интенсивности аэрации на основании линейной корреляции значений диаметра пузырька по Соутеру от эмпирического коэффициента, характеризующего изменение разности электродных потенциалов во флотомашине $d_{32} = f(E_f)$.

Теоретическая и практическая значимость работы:

В рамках разработанной методики определения флотуемости предложен вероятностно-кинетический подход к оценке скорости флотации минералов, связывающий вероятность флотационного извлечения и удельную константу скорости флотации. Обосновано наличие линейной корреляции между значением диаметра пузырьков по Соутеру и эмпирическим фактором E_f , характеризующим возрастание разности электродных потенциалов в камере флотомашин. Разработана программа для ЭВМ «Программа для определения показателей флотуемости на основании

вероятностно-кинетического подхода» (патент РФ № 2021681464 от 17.12.2021). Научные результаты исследований использованы в учебном процессе Факультета переработки минерального сырья «Санкт-Петербургского горного университета для студентов специальности «Обогащение полезных ископаемых» при проведении занятий по дисциплинам «Флотационные методы обогащения», «Технология переработки руд цветных металлов» и «Химия флотореагентов». Результаты диссертационного исследования использованы в деятельности ООО «Р-Центр» (акт о внедрении результатов кандидатской диссертации от 6 июля 2023 года) и АО «Механобр инжиниринг» (акт о внедрении результатов кандидатской диссертации от 15 сентября 2023 года) при проведении научно-исследовательских работ. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 19-17-00096).

Положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность установленных экспериментально-теоретических зависимостей изменения показателей флотуемости рудного сырья (удельной интенсивности аэрации S_b и функции распределения компонентов по флотуемости $\varepsilon_{K\phi}^{-P_n+P_{n+1}}$), а также критериев эффективности гидрофобизации минеральной поверхности K_ϕ и интенсификации процессов рудоподготовки K_θ позволяет обосновать решения по совершенствованию технологического режима измельчения и флотации золотосодержащих сульфидных руд.

2. Интерпретация результатов имитационного моделирования, базирующихся на установленных показателях флотуемости, позволяет обосновать совокупность технологических решений и аппаратное оформление флотационной схемы для повышения эффективности переработки золотосодержащих руд.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных исследований, их представительностью и сходимостью, оценкой полученных данных методами математической статистики; применением современного

оборудования и средств измерения, а также апробацией полученных результатов на международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XIX всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», 12-16 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург; Международная онлайн-конференция «XXIV International conference of Chemical Reactors ChemReactor-24», 12-17 сентября 2021 г., г. Милан, Италия; IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: Технологии, Наука, Образование», 26-28 октября 2021 года, г. Санкт-Петербург; XVIII международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 16-20 мая 2022 года, г. Санкт-Петербург; Международная конференция «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023)», 2-5 октября 2023 года, г. Москва.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора в получении научных результатов. Автором изучены и проанализированы существующие исследования по подходам к моделированию флотационных процессов и технологиям флотационного обогащения золотосодержащих руд, сформулированы и реализованы научно-исследовательские задачи, обоснованы научные положения. Непосредственное выполнение лабораторных исследований по флотации, определению минерального и химического состава проб, с последующей обработкой и статистической интерпретацией полученных

результатов. Разработка и обоснование эффективных технологических решений переработки золотосодержащих руд на основании разработанной методики определения показателей флотуемости рудного сырья.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 171 источник. Работа изложена на 193 страницах машинописного текста и содержит 82 рисунка, 27 таблиц, 5 приложений и список условных обозначений и сокращений.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю член-корреспонденту РАН, д.т.н., профессору Александровой Т.Н. за неоценимую помощь в работе, наставления и поддержку, а также коллективу кафедры обогащения полезных ископаемых за содействие при проведении диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

В первой главе представлен анализ существующих подходов к моделированию флотационных переделов и определению показателей флотуемости. Выявлено, что универсальность и гибкость флотационных методов обогащения ограничиваются сложностью данного процесса, что значительно осложняет прогнозирование результативности обогащения руд и, как следствие, понижает привлекательность внедрения новых технологических решений флотации и модернизации существующих схем. Потенциалом для внедрения технологий, повышающих эффективность флотационных переделов обладают схемы обогащения золотосодержащих сульфидных руд. Прогнозирование эффективности рассматриваемых способов повышения эффективности извлечения золотоносных сульфидов на стадии флотации возможно с применением методов имитационного моделирования на основании установления флотационной способности минералов.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе обоснован выбор золотосодержащих сульфидных руд Дальневосточного региона Российской Федерации как объекта исследования. Установлена задача флотационного передела таких руд - максимизация извлечения золотоносных минералов. Обоснован комплекс методов исследования особенностей вещественного состава руд, процессов измельчения и флотации золотосодержащих сульфидных руд.

В третьей главе приведены результаты экспериментально-теоретических исследования измельчаемости и флотационного обогащения сульфидных золотосодержащих руд.

Для установления особенностей флотации исследуемой руды предложена комплексная методика для определения параметров флотуемости рудного сырья. Для численного определения значения параметра удельной интенсивности аэрации предложен подход, основанный на возникающей разнице электродных потенциалов в камере флотомашины при аэрации. Для оценки эффективности применения интенсифицирующих воздействий на стадии измельчения предложен численный критерий, характеризующий меру преодоления сил внутреннего сцепления при разрушении. Предложен и обоснован критерий, численно характеризующий гидрофобизирующее действие реагентов-собирателей на основании значений полярной и дисперсионной составляющих свободной энергии поверхности.

В четвертой главе на основании результатов экспериментальных исследований флотуемости произведено имитационное моделирование флотационного передела золотосодержащих сульфидных руд с применением программного пакета JK SimFloat. К моделированию был принят фрагмент схемы переработки, включающий в себя стадию измельчения с контрольной классификацией, основную стадию флотации, стадии контрольной и перечистой флотаций.

В пятой главе приведены результаты экономической оценки эффективности предлагаемых технологических решений по переработке золотосодержащих руд.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Совокупность установленных экспериментально-теоретических зависимостей изменения показателей флотуемости рудного сырья (удельной интенсивности аэрации S_b и функции распределения компонентов по флотуемости $\varepsilon_{K\Phi}^{-P_n+P_{n+1}}$), а также критериев эффективности гидрофобизации минеральной поверхности K_Φ и интенсификации процессов рудоподготовки K_θ позволяет обосновать решения по совершенствованию технологического режима измельчения и флотации золотосодержащих сульфидных руд.

Коэффициент интенсификации процесса измельчения K_θ определялся, как соотношение произведения эмпирического коэффициента пропорциональности удельной энергии разрушений и относительной величины сокращения характеристической крупности на значение свободной энергии поверхности (1):

$$K_\theta = \frac{0,5\Delta S_i}{\left(\frac{1}{\sqrt{P_{80i}}} - \frac{1}{\sqrt{P_{800}}}\right)}, \quad (1)$$

где ΔS - прирост удельной площади поверхности; m^2/kg ;

P_{80i} – крупность, которой соответствует значение 80% суммарного выхода по минусу для продукта измельчения, полученного с применением интенсифицирующего воздействия, м;

P_{800} – крупность, которой соответствует значение 80% суммарного выхода по минусу для продукта измельчения, полученного без интенсифицирующего воздействия, м.

Оценка эффективности гидрофобизации минеральной поверхности производилась на основании значений компонент свободной энергии поверхности, характеризующей энергетический потенциал поверхности на образование связей. Установлено условие наиболее эффективной гидрофобизации поверхности собирателем (2):

$$K_{\phi} = \frac{\sigma_D}{\sigma_P} \begin{cases} \sigma_D \rightarrow \max \\ \sigma_P \rightarrow \min \\ \frac{\sigma_D}{\sigma_P} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (2)$$

где σ_D – значение дисперсионной составляющей свободной энергии поверхности, Дж/м²;

σ_P – значение полярной составляющей свободной энергии поверхности, Дж/м²;

Результаты исследования поверхностных свойств монофракций пирита при действии сульфгидрильных собирателей приведены на рисунке 1.

На основании исследования поверхностных свойств монофракций пирита установлен расход бутилового ксантогената калия, при котором достигается наибольшее значение критерия гидрофобизации. Также установлено, что среди смесей различных сульфгидрильных собирателей с бутиловым ксантогенатом калия (БКК) наибольшее значение критерия гидрофобизации соответствует смеси бутилового ксантогената калия и дибутилдитиофосфата натрия (ДБДТФН).

В ходе экспериментальных исследований процесса аэрации установлена линейная корреляция между значением диаметра пузырьков по Соутеру и эмпирическим фактором E_f , характеризующим изменение разности электродных потенциалов в камере флотомашины во времени. Графическая интерпретация результатов исследований приведена на рисунке 2.

На основании полученных результатов установлена зависимость для численного определения параметра удельной интенсивности аэрации (3):

$$S_b = \frac{6Q_a}{10^{-3}S(-0,139E_f + 1,9942)}, \quad (3)$$

где Q_a – расход воздуха, м³/с;

E_f – эмпирический коэффициент, характеризующий изменение разности электродных потенциалов во флотомашине;

S – площадь поперечного сечения камеры флотомашины, м².

Максимум значения параметра удельной интенсивности аэрации равен $9,91 \text{ с}^{-1}$ на исследованных диапазонах варьирования факторов достигнут при расходе воздуха = 2 л/мин и расходе вспенивателя = 45 г/т.

Для характеристики неравномерности флотационных свойств руды в работе предложена функция распределения компонента по флотуемости. Определение функции основано на пропорциональности вероятности флотационного извлечения и удельной константы скорости флотации фракции материала с близкими флотационными свойствами. Значение константы быстрофлотуемой фракции компонента определяется на основании экспериментального определения статистических параметров гамма модели кинетики флотации, а затем приводится к значению константы требуемой для корректного анализа. Распределение компонента по фракциям характеризуется степенной функцией с показателем b . Графическая интерпретация приведена на рисунке 3.

Общий преобразованный вид функции распределения компонента в узкий класс флотуемости с граничными значениями вероятности флотационного извлечения представлен формулой (4):

$$\varepsilon_{\text{КФ}}^{-P_n+P_{n+1}} = \varepsilon_i \left(\frac{\ln(10)\beta}{\alpha F'} \right)^b \cdot \left[\left(\frac{1}{t_{P_n}^{90\%}} \right)^b - \left(\frac{1}{t_{P_{n+1}}^{90\%}} \right)^b \right], \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{КФ}}^{-P_n+P_{n+1}}$ - значение функции распределения флотуемого компонента в класс флотуемости с максимальным значением и минимальным вероятности флотационного извлечения P_n и P_{n+1} соответственно, %;

α, β – статистические параметры гамма модели флотации;

$t_{P_n}^{90\%}$ - время извлечения 90% класса флотуемости в котором вероятность извлечения материала меньше или равна P_n ;

F' - коэффициент пропорциональности между значением требуемой константы быстрофлотуемой фракции и установленным значением по результатам гамма модели, при их равенстве принимается равным 1,

b – показатель распределения материала по классам флотуемости;

ε_i – значение суммарного извлечения компонента в исследуемом продукте или фракции, %.

Алгоритм определения параметров функции представлен на рисунке 4.

Графическая интерпретация результатов определения показателей флотуемости для обоснованного реагентного режима измельчения и флотации приведена на рисунке 5. На основании анализа полученных данных установлено, что применение на стадии измельчения перманганата калия, а на стадии флотации смеси сульфгидрильных собирателей обеспечивает значительное снижение нефлотуемой фракции рудных минералов в классах крупности -200+71 мкм и -71+40 мкм по сравнению со случаем применения только БКК и без интенсифицирующего воздействия на стадии измельчения. Экспериментально подтверждено наибольшее извлечение золота и наибольшее распределение серы и мышьяка во флотуемые классы при реагентном режиме, обоснованном на установленных значениях предложенных критериев K_ϕ и K_θ .

2. Интерпретация результатов имитационного моделирования, базирующихся на установленных показателях флотуемости, позволяет обосновать совокупность технологических решений и аппаратное оформление флотационной схемы для повышения эффективности переработки золотосодержащих руд.

Установленные показатели флотуемости использованы при имитационном моделировании фрагмента схемы переработки золотосодержащих руд в программном пакете JK SimFloat. Выходными данными являлись прогнозируемые технологические показатели продуктов флотационного обогащения. Блок-схема имитационного моделирования приведена на рисунке 6.

Произведено моделирование технологических решений, базирующихся на установленных показателях флотуемости для случаев:

- применение только БКК в качестве собирателя;
- применение смеси БКК и ДБДТФН в качестве собирательной смеси и применение перманганата калия на стадии измельчения;

-применение смеси БКК и керосина в качестве собирательной смеси и применение перманганата калия на стадии измельчения;
-применение колонных флотомашин на стадии перерывной операции.

Полученные результаты моделирования сведены в таблицу 1.

На основании полученных результатов имитационного моделирования установлено, что наибольшее извлечение золота в концентрат перерывной операции достигается при совместном применении перманганата калия на стадии измельчения и смеси сульфидрильных собирателей, а также реализации колонной флотации на стадии перерывки. Для результатов моделирования вариантов с применением пневмомеханических флотомашин произведены заверочные опыты флотационного обогащения в лабораторных условиях. Расхождения между экспериментально установленными значениями технологических показателей концентрата перерывки и установленными в ходе моделирования не превысили 10%.

Результат моделирования наиболее эффективной совокупности технологических решений по переработке золотосодержащих руд приведен на рисунке 7.

Экономическая оценка, произведенная на основании определения минимального рентабельного объема производимой продукции и сравнения с прогнозируемым значением производительности схемы по готовому продукту, подтвердила рентабельность предлагаемых технологических решений по повышению эффективности переработки золотосодержащих сульфидных руд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается решение актуальной научной задачи по развитию методического подхода к определению показателей флотуемости для повышения эффективности переработки золотосодержащих руд. В рамках данного исследования был проведен комплекс экспериментально-теоретических исследований измельчаемости и флотационного обогащения руд Дальневосточного региона Российской Федерации.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Предложенная функция распределения компонентов рудного сырья по классам флотуемости позволяет установить степень неравномерности флотационных свойств для различных классов крупности на основании интерпретации результатов кинетических исследований флотационного обогащения. Разработана программа для ЭВМ «Программа для определения показателей флотуемости на основании вероятностно-кинетического подхода».

2. Обоснован критерий оценки эффективности гидрофобизации K_f поверхности сульфидного минерала сульфгидрильными собирателями на основании определения значения компонент свободной энергии поверхности. Установлены реагенты-собиратели, обуславливающие эффективную гидрофобизацию минеральной поверхности сульфидных минералов.

3. Предложен и экспериментально обоснован критерий эффективности интенсификации процесса измельчения K_θ , который позволил обосновать применение перманганата калия для повышения эффективности измельчения.

4. Разработан подход для определения значения параметра удельной интенсивности аэрации на основании значений возникающей разницы электродных потенциалов во флотомашине.

5. По результатам имитационного моделирования установлено, что наибольшее прогнозируемое извлечение золота достигается при реализации обоснованной по предложенным критериям и показателям флотуемости совокупности технологических решений переработки золотосодержащих руд.

6. Сравнительный анализ минимального рентабельного объема продукции и прогнозируемой производительности предлагаемой схемы по концентрату подтвердила экономическую целесообразность предлагаемых решений.

7. В качестве перспектив дальнейшего исследования по теме диссертации можно отметить тиражирование разработанного комплекса методик определения параметров флотуемости на другие типы руд и создание на основе полученных результатов базы

данных флотуемости минералов для выявления общих закономерностей флотационного обогащения. Планируется полученные новые технологические решения довести до стадии ОКР (опытно-конструкторских работ) и промышленной апробации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Александрова, Т.Н. Подход к определению удельной интенсивности аэрации при флотации / Т.Н. Александрова, **В.В. Кузнецов** // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 5. – С. 125-136 (№132 Перечня ред.12.04.2022 МБДиСЦ СА(pt), Scopus, Springer, WoS(SCIE))

2. Александрова, Т.Н. Исследование прочностных свойств золотосодержащей руды Бамского месторождения / Т.Н. Александрова, Н.В. Николаева, **В.В. Кузнецов** // Горный журнал. – 2021. – № 11. – С. 27-33. – DOI 10.17580/gzh.2021.11.03 (№537 Перечня ред.22.10.2021 МБДиСЦ СА(pt), Scopus)

3. **Кузнецов, В.В.** Развитие методов определения флотуемости минералов для эффективных технологий флотации / В.В. Кузнецов, Т.Н. Александрова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 145-154. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_145. (№549 Перечня ред.12.04.2022 МБДиСЦ Scopus)

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Aleksandrova, T.N. Development of a methodological approach to establishing the floatability of finely disseminated sulfides / Aleksandrova T.N., Romashev A.O., Kuznetsov V.V. // Obogashchenie Rud. – 2020. – Vol 2. – P. 9-14. – DOI 10.17580/or.2020.02.02.

5. Koteleva, N.A. Simulator for educating the digital technologies skills in industry. Part one. Dynamic simulation of technological processes / N. Koteleva, **V. Kuznetsov**, N. Vasilyeva // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11, No. 22. – DOI 10.3390/app112210885.

6. Aleksandrova, T.N. Investigation of the water hardness ions impact on the copper-nickel ores flotation probability /

Aleksandrova T.N., **Kuznetsov V.V.**, Ivanov E.A. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2022. – Vol. 6-1. – P. 263-278. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_61_0_263.

Публикации в прочих изданиях:

7. Aleksandrova, T. Justification for Criteria for Evaluating Activation and Destruction Processes of Complex Ores / Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., **Kuznetsov V.** // Minerals. – 2023. – 13. – 684. – DOI 10.3390/min13050684.

8. **Кузнецов, В.В.** Применение вероятностно-кинетического подхода к оценке флотуемости минералов в прикладных целях / В.В. Кузнецов // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–21 мая 2022 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 359-361.

9. Aleksandrova, T.N. Modeling of separating reactors in mineral processing technologies / T.N. Aleksandrova, **V.V. Kuznetsov**, A.V. Aleksandrov, N.V. Nikolaeva // CHEMREACTOR-24 : Сборник тезисов докладов XXIV International Conference on Chemical Reactors, Milan, Italy, 12–17 сентября 2021 года / Editors: Alexandr Noskov, Gianpiero Groppi, Andrey Zagoruiko, Matteo Maestri. – г. Новосибирск: Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, 2021. – P. 273-274.

10. Александрова, Т.Н. Установление флотуемости золотоносных сульфидных руд для повышения эффективности их переработки / Т.Н. Александрова, **В.В. Кузнецов** // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). – М.: Издательство «Спутник +», 2023. – С. 268-271.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681464 Российская Федерация. Программа для определения показателей флотуемости на основании вероятностно-кинетического подхода: № 2021680951:

заявл. 17.12.2021 : опубл. 22.12.2021 / Т.Н. Александрова, **В.В. Кузнецов**, Е.А. Иванов; заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

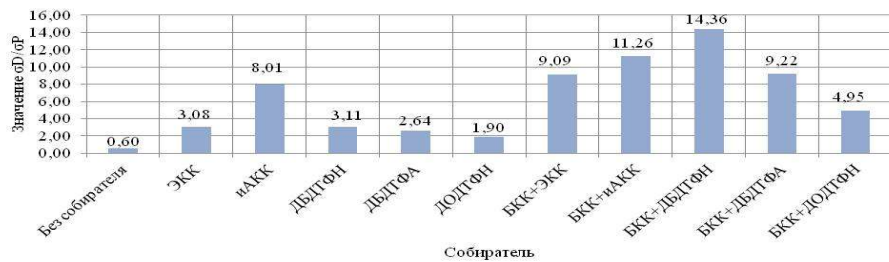
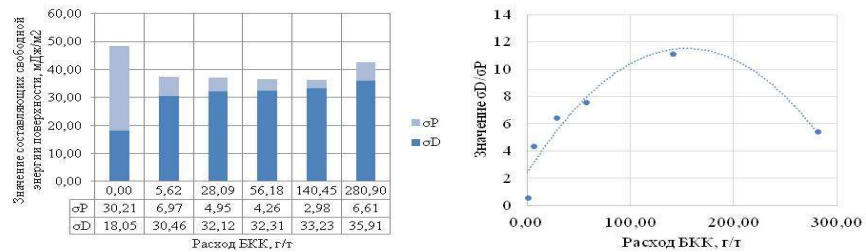


Рисунок 1 – Результаты исследования поверхностных свойств сульфидных минералов при действии сульфгидрильных собирателей

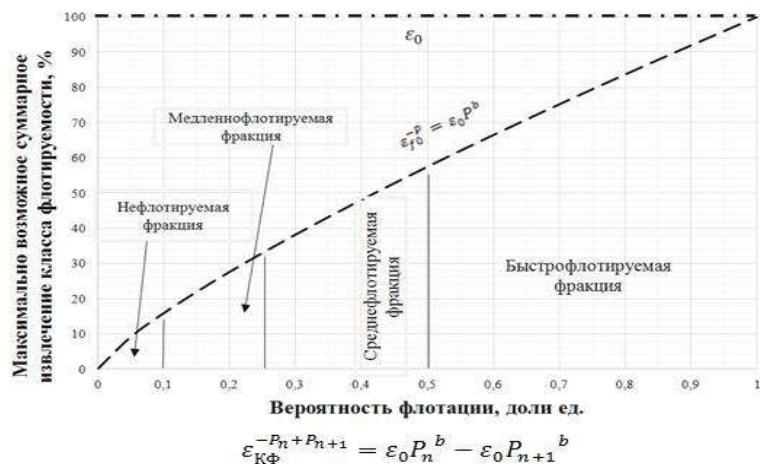


Рисунок 3 – Графическая интерпретация функции распределения компонента по классам флотуемости

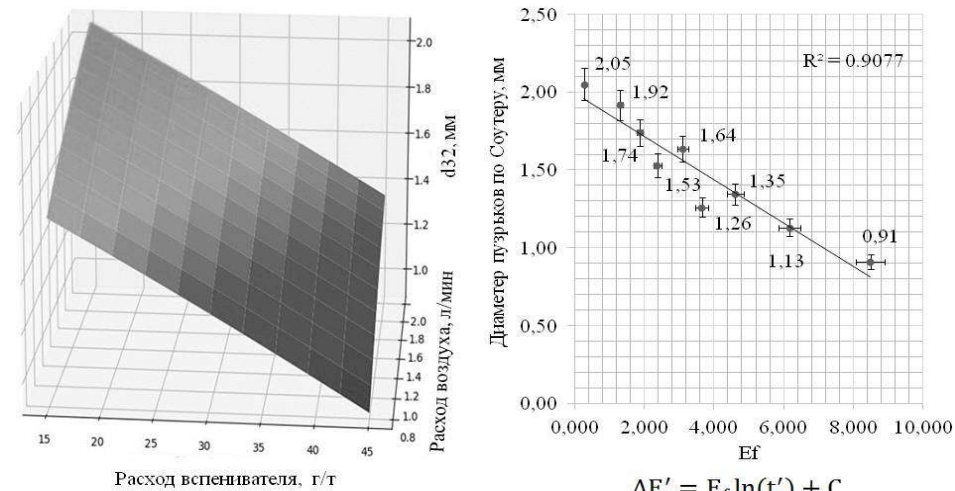


Рисунок 2 – Результаты исследований взаимосвязи значений диаметров пузырьков по Соутеру и эмпирического фактора E_f

- 1 • Задание требуемой константы быстрофлотуемой фракции и граничных значений вероятности для классов флотуемости
- 2 • Проведение экспериментальных исследований кинетики флотации
- 3 • Интерпретация результатов кинетики с применением гамма модели. Установление параметров α, β
- 4 • Установление значения константы быстрофлотуемой фракции исследуемого компонента. Определение параметра F'
- 5 • Установление значения параметра b
- 6 • Определение значений функции распределения компонентов по классам флотуемости

Рисунок 4 – Алгоритм определения значений функции распределения анализируемого компонента по фракциям флотуемости

Добавление перманганата калия в измельчение (100 г/т),
 Активатор – Медный купорос (200 г/т); рН – 8,5-8,7 (Сода);
 Депрессор – Декстрин (80 г/т); Собиратель – БКК + ДБДФН
 (98,42 г/т + 49,21 г/т), Пенообразователь – МИЕК (45 г/т)

Класс флотиремости	к, с ⁻¹
Быстрофлотиремая фракция	0,00763
Среднефлотиремая фракция	0,00382
Медленнофлотиремая фракция	0,00076
Нефлотиремая фракция	-

Параметры	-200+71 мкм		-71+40 мкм		-40 мкм	
	S	As	S	As	S	As
α	0,4021	0,3847	0,4178	0,3839	0,3275	0,2754
β	3,7480	3,3997	3,4941	2,7903	2,4788	2,3208
k _{в*}	0,1073	0,1132	0,1196	0,1376	0,1321	0,1186
P [*]	0,0711	0,0674	0,0638	0,0555	0,0578	0,0643
b	0,5313	0,5264	0,6720	0,7102	0,5348	0,3689

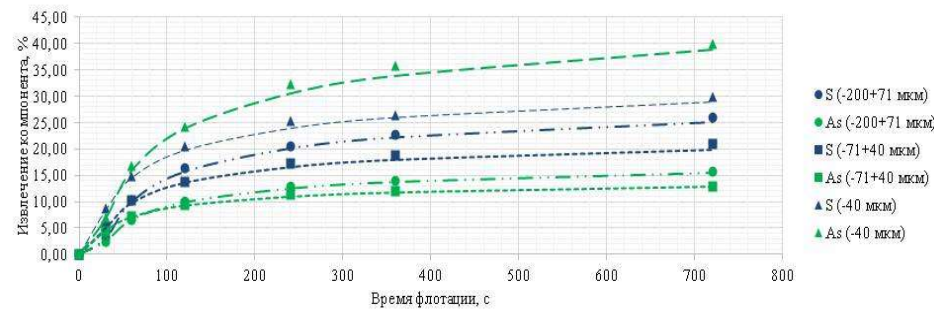


Рисунок 5 – Установленные параметры флотиремости для компонентов рудных минералов для обоснованного реагентного режима измельчения и флотации

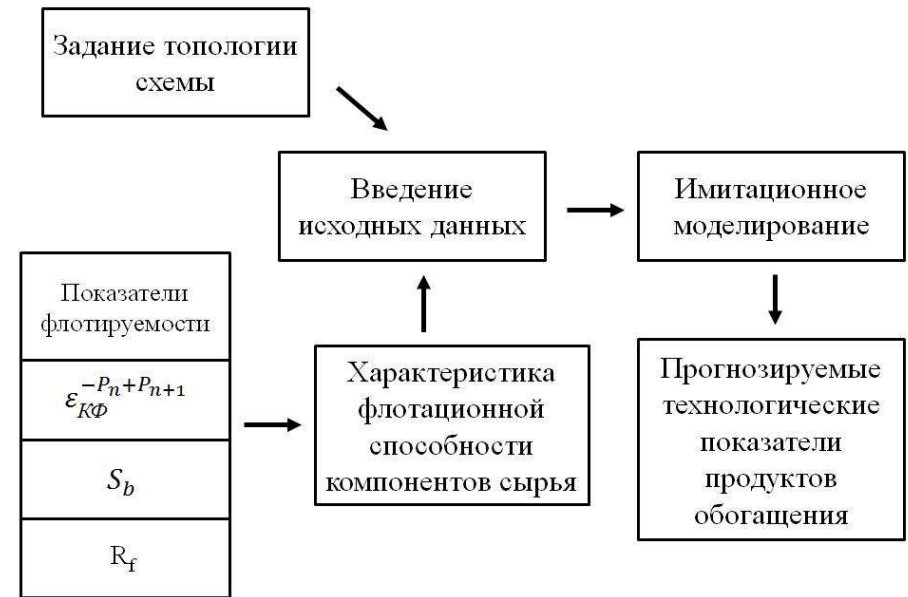
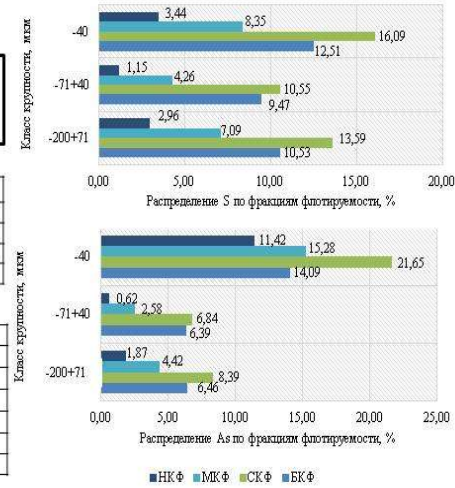


Рисунок 6 – Блок-схема имитационного моделирования флотационной переработки золотосодержащих руд

Таблица 1 – Результаты имитационного моделирования фрагмента схемы переработки золотосодержащих руд

Аппаратурное оформление перечистной операции	Референсный режим (только БКК)	Применение смеси БКК и ДБДТФН в соотношении 2:1	Применение перманганата калия в измельчении	Замена ДБДТФН на керосин	γ , %	$\beta(S)$, %	$\beta(As)$, %	$\beta(Au)$, г/т	$\varepsilon(S)$, %	$\varepsilon(As)$, %	$\varepsilon(Au)$, %
Пневмомеханическая ФМ	+	-	-	-	6,88	12,22	4,83	30,38	66,84	49,56	56,17
	-	+	-	-	7,17	12,97	5,93	35,02	73,96	63,56	67,54
	-	+	+	-	9,23	10,60	5,05	29,33	77,77	69,61	72,73
	-	-	+	+	10,33	8,07	3,46	20,99	66,33	53,34	58,31
Колонная ФМ	+	-	-	-	8,22	11,25	5,01	29,91	73,56	61,47	66,10
	-	+	-	-	8,76	11,48	5,35	31,33	79,89	69,93	73,75
	-	+	+	-	10,76	9,67	4,71	27,11	83,23	75,73	78,59
	-	-	+	+	12,78	7,21	3,18	19,05	73,26	60,63	65,46

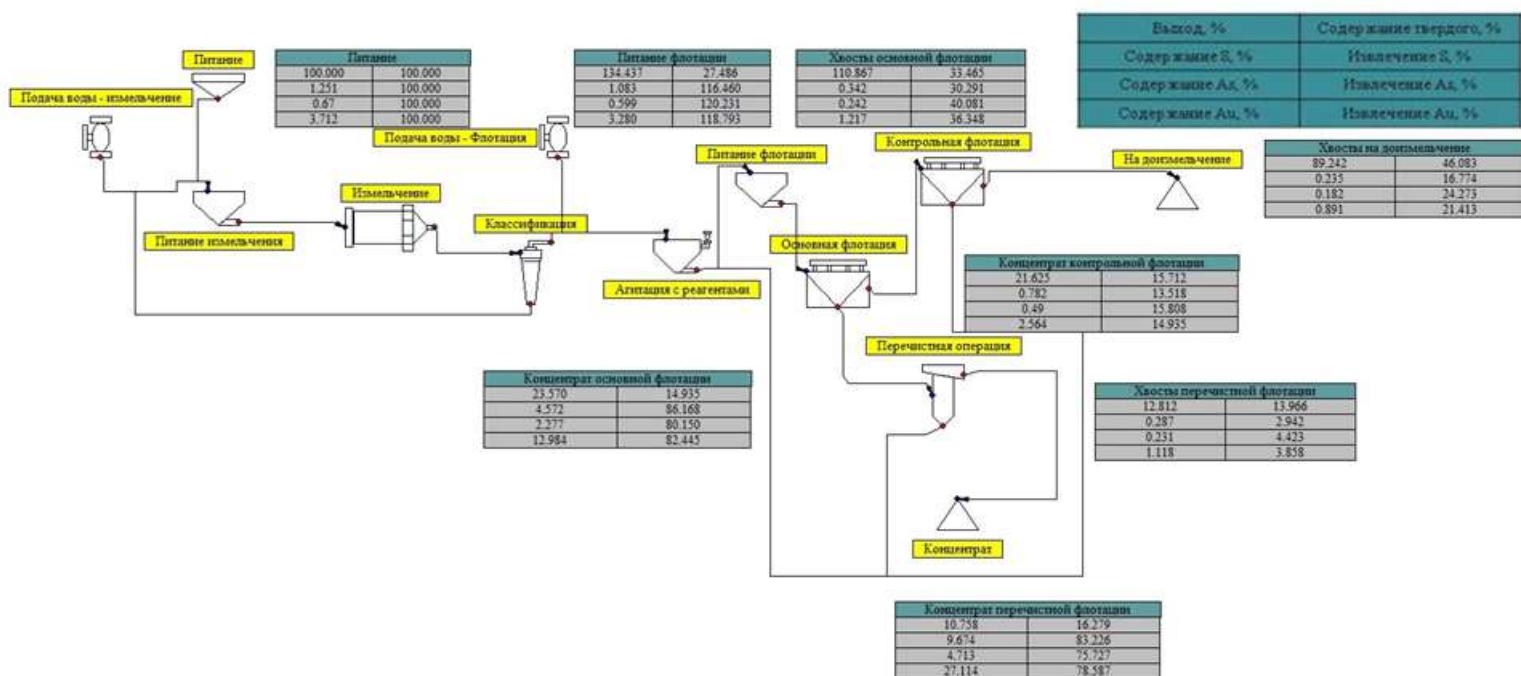


Рисунок 7 – Результаты моделирования схемы наиболее эффективной совокупности технологических решений