



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Магнитогорский государственный
технический университет**

им. Г. И. Носова»
(ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»)
пр. Ленина, д. 38, г. Магнитогорск, Челябинская обл., 455000
Тел.: 8 (3519) 29-84-02; Факс: 8 (3519) 23-57-59, 29-84-26
E-mail: mgtu@mgtu.ru; <http://www.mgtu.ru>
ОКПО 02069384, ОГРН 1027402065437,
ИНН/КПП 7414002238/745601001

Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation
Federal State Budgetary
Educational Institution of Higher Education
**«Nosov Magnitogorsk State
Technical University»**

(FSBEIHE «NMSTU»)
38, Lenin Street, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000
Tel.: +7 3519 298 402; Fax: +7 3519 235 759, +7 3519 298 426
E-mail: mgtu@mgtu.ru; <http://www.mgtu.ru>
ОКПО 02069384, ОГРН 1027402065437
INN/KPP 7414002238/745601001

05.02.2024

№ 66.04-344

На/To № _____ от/dated _____



Терентьев Д.В.

О Т З Ы В

**ведущей организации на диссертацию *Кузнецова Валентина Вадимовича*
на тему: «Развитие методов определения показателей флотурируемости
минералов для разработки эффективных технологических решений
при переработке золотосодержащих руд»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.8.9 Обогащение полезных ископаемых.**

Представленная на рассмотрение работа состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников из 171 наименования, изложена на 193 страницах машинописного текста, включая 82 рисунка, 27 таблиц, 5 приложений и список условных обозначений и сокращений.

1. Актуальность темы диссертации

Современная промышленность столкнулась с проблемой снижения количества месторождений россыпных золотых руд, характеризующихся легкой обогатимостью. Растущий спрос на благородные металлы диктует потребность все большего вовлечения в переработку коренных месторождений золотых руд. Однако минералого-технологические особенности большинства руд данного типа придают им характер «технологической упорности» к извлечению золота и обуславливают снижение эффективности цианирования. Поэтому широкий спектр современных научных работ лежит в области повышения эффективности флотационной переработки упорных золотосодержащих руд и изыскания способов интенсификации их обогащения. Повышение показателей переработки

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-15 ОТ 12.02.24
АУ УС

золотосодержащих руд за счет совершенствования существующих технологических схем, режимов и их аппаратного оформления остается актуальной научно-практической задачей. Предложению и обоснованию новых решений по повышению эффективности переработки упорных золотосодержащих руд и развитию методического подхода к определению флотационной способности тонковкрапленных сульфидов посвящена кандидатская диссертация Кузнецова Валентина Вадимовича.

Существующая потребность повышения эффективности переработки упорного рудного золота в Российской Федерации, необходимость прогнозирования эффективности предлагаемых способов повышения эффективности флотационного извлечения золотоносных сульфидов и применения для этого современных методов имитационного моделирования на основании разработанных автором показателей флотуемости минералов делают диссертационное исследование Кузнецова Валентина Вадимовича особенно актуальным.

Разработка новых методов и подходов к оценке флотуемости рудного сырья, моделирования процессов флотации, позволяющих весьма оперативно и с высокой степенью достоверности спрогнозировать показатели флотации упорных видов минерального сырья, сырья новых месторождений, обосновывать и апробировать технологические решения по измельчению и флотационной переработке золотосодержащих руд и руд цветных металлов имеют высокую научную и практическую значимость в современных экономических условиях.

2. Научная новизна диссертации

Научную новизну диссертационного исследования В. В. Кузнецова составляют разработка, теоретическое обоснование и экспериментальная верификация методики определения параметров флотуемости рудного сырья на основании предложенного автором вероятностно-кинетического подхода.

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.

В работе исследованы технологические решения, повышающие эффективность обогащения руд, в которых золото тесно ассоциировано с сульфидными минералами. Автором предложены и обоснованы решения по интенсификации процесса измельчения за счет применения интенсификаторов помола и повышения эффективности флотации за счет изменения состава собирательной смеси.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений подтверждается достаточным объемом проведенных экспериментальных

исследований, их представительностью и сходимостью, оценкой полученных данных методами математической статистики. Натурные эксперименты проводились с применением современного оборудования и средств измерений. Особенности вещественного состава пробы упорной золотосодержащей руды и продуктов измельчения и обогащения изучены методами СЭМ, РФА, атомно-адсорбционной спектроскопии, оптической микроскопии. Обработка данных имитационного моделирования проводилась с использованием современного программного обеспечения.

Автор работы, используя известные параметры и существующие подходы к моделированию флотационных процессов и к оценке флотационной способности минералов, а также результаты изучения вещественного состава объекта исследования, корректно обосновал и экспериментально подтвердил комплекс методов исследования особенностей измельчения и флотационного обогащения золотосодержащих сульфидных руд. Таким образом, в работе результативно комплексуются методы теоретического анализа, экспериментальные исследования по известным и предлагаемым методикам, имитационное моделирование, результаты которого верифицируются серией опытов флотационного обогащения в замкнутом цикле, что свидетельствует об обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Расхождения экспериментальных результатов и результатов моделирования флотационного передела золотосодержащей сульфидной руды на основании значений показателей флотуемости в программном пакете JK Sim Float по основным технологическим показателям концентрата перечистой флотации не превысили 10%, что говорит о хорошей сопоставимости полученных результатов.

Работа прошла достаточно широкую апробацию на международных и всероссийских семинарах и конференциях: XIX всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», международная онлайн-конференция «XXIII International conference of Chemical Reactors ChemReactor-24»; IV Международная практическая конференция «Горное дело в XXI веке: Технологии, Наука, Образование»; XVIII международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования»; международная конференция «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2023)».

Тема диссертации, направленность проведенных исследований и полученных результатов соответствуют паспорту научной специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых по пунктам:

1. Повышение контрастности технологических свойств разделяемых минералов. Физические, физико-химические и химические процессы разделения,

концентрации и переработки минералов, руд, промежуточных продуктов переработки природного и техногенного минерального сырья;

2. Моделирование, контроль, цифровизация, автоматизация технологических процессов обогащения, их оптимизация.

4. Научные результаты, их ценность

Основную научную ценность работы составляет совокупность теоретически обоснованных и экспериментально установленных зависимостей изменения показателей флотуемости рудного сырья (удельной интенсивности аэрации S_b и функции распределения компонентов по флотуемости $\varepsilon_{KФ}^{-P_n+P_{n+1}}$), критериев эффективности гидрофобизации минеральной поверхности $K_ф$ и интенсификации процессов рудоподготовки $K_г$, что позволяет обосновывать новые решения по совершенствованию технологического режима измельчения и флотации золотосодержащих сульфидных руд. А также использование этих установленных в ходе экспериментально-теоретических исследований значений показателей измельчаемости и флотуемости при имитационном моделировании флотационного передела золотосодержащих сульфидных руд, что позволяет получать прогнозируемые значения основных технологических показателей при внедрении новых реагентных режимов, нового типа флотационного оборудования и других новых технических решений в целях повышения эффективности переработки золотосульфидных руд.

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 международные базы данных и системы цитирования Scopus и WoS; получен 1 патент.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

К наиболее значимым теоретическим и практическим результатам работы, на наш взгляд, относятся следующие.

Обоснована комплексная методика для определения параметров флотуемости рудного сырья – функции распределения материала по классам флотуемости и параметра удельной интенсивности аэрации.

Предложен подход для численного определения значения параметра удельной интенсивности аэрации, основанный на возникающей разнице электродных потенциалов в камере флотомашинны.

Подобрана методика определения численного фактора, связывающего извлечение нефлотуемых фракций минералов и извлечение воды в пенный продукт для оценки влияния фактора механического выноса на результат флотации.

Предложен численный критерий K_g , характеризующий меру преодоления энергетического барьера внутренних сил сцепления при разрушении минеральных сростков, и экспериментально подтверждено на основании критерия применение в качестве разупрочняющего реагента при измельчении перманганата калия.

Предложен и обоснован критерий K_ϕ , численно характеризующий гидрофобизирующее действие реагентов-собирателей на основании значений полярной и дисперсионной составляющих свободной энергии поверхности. Выбор собирателя или собирательной смеси может производиться обоснованно по наибольшему значению критерия K_ϕ .

На основании экспериментально определенных значений составляющих свободной энергии поверхности и критерия K_ϕ как показателя эффективности гидрофобизации, рассчитано значение расхода собирателя БКК, при котором достигается наиболее эффективная гидрофобизация поверхности пирита, также по наибольшему значению K_ϕ обоснована собирательная смесь бутилового ксантогената калия и дибутилдитиофосфата натрия из всех исследованных композиций. Эта смесь была принята к дальнейшим флотационным исследованиям.

Получена линейная зависимость диаметра пузырька по Соутеру d_{32} от эмпирического фактора E_b , характеризующего скорость возрастания разности электродных потенциалов на различной глубине камеры флотомшины. Произведен расчет значений удельной интенсивности аэрации S_b , который подтвердил, что максимум значения удельной интенсивности аэрации достигается при расходе воздуха 2 л/мин и расходе вспенивателя 45 г/т. Установленное максимальное значение параметра $S_b = 9,9096 \text{ с}^{-1}$, принято к дальнейшим исследованиям.

На основании экспериментальных данных были установлены значения фактора механического выноса ENT_i для различных классов крупности и для кремния, серы и мышьяка.

Проведено теоретическое обоснование методики определения показателей флотуемости рудного сырья на основании авторского вероятностно-кинетического подхода и представлен авторский алгоритм определения значений функции распределения компонента по классам флотуемости на основании γ -модели кинетики флотации.

Проведено сравнение результатов референсной серии флотационных опытов и рассчитанных по гамма-модели кинетики флотации значений суммарных извлечений компонентов в пенный продукт в каждом классе крупности, что подтвердило адекватность модели, так как расхождения суммарных расчетных и экспериментальных значений извлечений не превышали 6%.

На основании установленных значений параметров гамма-модели кинетики флотации были рассчитаны значения функций распределений серы и мышьяка, что

позволяет производить анализ распределения компонентов по классам флотуемости в классах различной крупности и делать выводы о необходимости изменения режимных параметров измельчения и флотации.

Проведено сравнение результатов исследований флотуемости золотосодержащей руды экспериментальных и расчетных при предлагаемых автором решениях по интенсификации извлечения минералов-носителей золота во флотуемые классы (применение смеси БКК с ДБДТФН, интенсификатора помола и БКК с ДБДТФН, интенсификатора помола и смеси БКК с керосином), которое также подтвердило высокую сходимость результатов, расхождение результатов не превышало 6%.

Графическая интерпретация значений функций распределения компонентов в классах флотуемости по классам различной крупности, полученных в ходе расчетов с применением гамма-модели флотации, при предлагаемых технических решениях позволяет проводить сравнительный анализ их эффективности при переработке золотосодержащих руд и делать выводы об их обоснованности. Так, было установлено, что наибольший прирост распределения компонентов во флотуемые классы имеет место при применении комбинации сульфидрильных собирателей и интенсификатора помола. Экспериментально было подтверждено наибольшее извлечение золота и наибольшее распределение серы и мышьяка во флотуемые классы при совместном применении интенсификатора помола и смеси сульфидрильных собирателей.

Имитационное моделирование влияния внедрения новых технических решений на эффективность переработки золотосодержащих руд показало, что наибольшее извлечение золота в концентрат перечистой операции достигается при совместном применении интенсификатора помола и смеси сульфидрильных собирателей, а также реализации перечистой флотации в колонной флотомашине за счет перераспределения минералов-носителей золота в быстрофлотуемую и среднефлотуемую фракции.

Экспериментальная верификация полученных результатов моделирования схемы флотационного передела в программном пакете JK Sim Float подтвердила, что наибольшее извлечение золота в концентрат перечистой флотации достигается при применении интенсификатора помола совместно со смесью сульфидрильных собирателей. Расхождения экспериментально полученных результатов и результатов моделирования по основным технологическим показателям концентрата перечистой флотации не превысили 10%.

Разработана программа для ЭВМ «Программа для определения показателей флотуемости на основании вероятностно-кинетического подхода» (патент РФ № 2021681464 от 17.12.2021).

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.

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». Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 19–17–00096).

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы в виде разработанного комплекса методик определения параметров флотуемости могут быть с высокой эффективностью использованы в деятельности научно-исследовательских и проектных институтов при выявлении общих закономерностей флотационного обогащения различных видов минерального сырья, при разработке технологических регламентов по переработке золотосодержащих руд, руд цветных металлов, в деятельности научно-исследовательских и инжиниринговых центров при технико-экономической оценке целесообразности переработки сырья и при разработке новых технологических решений флотационного обогащения золотосодержащего и других видов сложного сырья, при модернизации действующих переделов, в деятельности исследовательских лабораторий при совершенствовании технологических режимов действующих предприятий и оптимизации параметров их работы, при анализе и оценке параметров действующих производств.

Также рекомендуется широкое использование результатов диссертационного исследования в научно-исследовательской и образовательной деятельности высших учебных заведений при подготовке специалистов, аспирантов.

7. Замечания и вопросы по работе

По диссертации и автореферату возникли следующие вопросы и замечания.

1. Выбор и обоснование реагентов-интенсификаторов измельчения для наглядности следовало сопроводить уравнениями происходящих реакции.
2. Следовало показать (хотя бы в качестве одного примера), как на основании значений краевых углов смачивания для мономинерального образца пирита (табл. 3.3) был произведен расчет дисперсионной и полярной составляющих свободной энергии поверхности в п.3.3.
3. Не вполне понятно на основании чего материал разбивается на 4 фракции (быстрофлотуемая, среднефлотуемая, медленнофлотуемая, нефлотуемая) в предлагаемом авторском вероятностно-кинетическом подходе. Следовало уделить

этому большее внимания. Также требует пояснения, что понимается под нефлотируемой фракцией со значением вероятности флотации от P_4 до 0.

4. Таблицы 3.6 и 3.7 имеют одинаковое название Граничные значения констант скорости флотации каждого класса флотируемости. Также требуется пояснить, как задавался: диапазон значений вероятности флотационного извлечения для классов флотируемости в таблице 3.7.

5. Как задаются временные интервалы выделения фракций различной флотируемости?

6. В заверочной серии целесообразно было бы представить для продуктов обогащения, кроме содержания серы, мышьяка, золота, их минеральный состав, распределение в них сульфидов, фазовые формы золота.

7. Не всегда четко выделяется, какие методики, модели, математические выражения являются авторскими разработками, а какие являются известными и использованы под решаемые задачи.

Также по тексту диссертации имеются некоторые опечатки: на стр. 69 «...Расчет K_{σ} для случаев применения разупрочняющих реагентов при измельчении производился по формуле (4)». Должно быть указано K_{σ} и расчет по формуле 3.5.; стр. 78 «...Наименьшее сокращение значения полярной составляющей получено при обработке монофракции смесью БКК и ДБДТФН». Должно быть «...наибольшее значение...»; стр. 83 «...На основании значений, представленных в таблице 2, установлено...». Должна быть ссылка на табл. 3.4.; в табл. 3.20 размерность содержания золота в % вместо г/т; на рис. 3.25 диапазон вероятности флотации нефлотируемой фракции от 0 до 0,1 доли. ед., в то время как в табл. 3,7 он указан как 0,01-0 доли ед.; стр. 140 рефересная серия вместо референсная.

Высказанные замечания не являются принципиальными, не снижают ценности диссертации, её научной и практической значимости и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационное исследование Кузнецова Валентина Вадимовича характеризуется внутренним единством, аргументированным изложением материала, содержит новые научные положения и практические результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора в развитие методических оснований флотационного обогащения золотосодержащих руд.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Развитие методов определения показателей флотируемости минералов для разработки эффективных технологических решений при переработке золотосодержащих руд», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. – Обогащение полезных ископаемых, полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета от 20.05.2021 № 953 адм., а ее автор – Кузнецов Валентин Вадимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

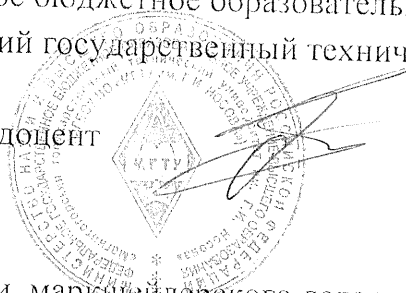
Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации Кузнецова Валентина Вадимовича обсужден и утвержден на заседании кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», протокол №4 от 17 января 2024 года.

Председатель заседания

Заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

кандидат технических наук, доцент



Гришин Игорь Анатольевич

Секретарь заседания

Профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых

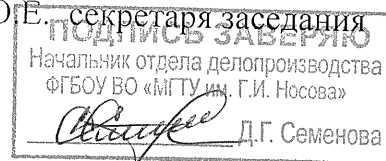
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

им. Г.И. Носова»

доктор технических наук, доцент

Горлова Ольга Евгеньевна

Подпись Гришина И.А. председателя заседания и Горловой О.Е. секретаря заседания заверяю



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Официальный сайт в сети Интернет: <https://www.magtu.ru/>

эл. почта: mgtu@magtu.ru

телефон: +7 (800) 100-1934

Горлова О.Е.

(3519) 29-85-55