

На правах рукописи

Читалов Леонид Сергеевич



**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
СУЛЬФИДНЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД**

Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

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

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Львов Владислав Валерьевич

Официальные оппоненты:

Пелевин Алексей Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра обогащения полезных ископаемых, профессор;

Мезенин Антон Олегович

кандидат технических наук, научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (акционерное общество), руководитель отдела продаж.

Ведущая организация – акционерное общество "Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки полезных ископаемых "Уралмеханобр", г. Екатеринбург.

Защита состоится 29 сентября 2021 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Горного университета ГУ 212.224.03 адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д.2, ауд. 1171а.

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

Автореферат разослан 29 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

БОДУЭН
Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное индустриальное общество не может существовать без эксплуатации широкого диапазона рудоподготовительных технологий. При этом до 70 % капитальных и эксплуатационных затрат при переработке полезных ископаемых приходится на рудоподготовку.

В последние десятилетия принято выделять два пути экономии средств в этой области – через применение инновационных технологий переработки сырья и улучшение существующей технологии. Последнее, в большей степени, подразумевает оптимизацию работы рудоподготовительных аппаратов, т.е. обеспечение эксплуатации установленного оборудования настолько эффективно, насколько это возможно.

По мере развития общества, в отношении прикладных задач большое значение приобретают информационные технологии, что оказывает значительное влияние и на технологии обогащения полезных ископаемых. С ростом вычислительных мощностей и удобства их использования, инструменты моделирования отдельных аппаратов и целых технологических схем переработки рудного сырья применяются всё чаще, оправдывая свое существование и доказывая неизбежность их использования в будущем. На замену дорогостоящим полупромышленным испытаниям приходят инструменты комплексного лабораторного определения физико-механических свойств руд, расчета и выбора оборудования с последующим компьютерным моделированием циклов рудоподготовки и обогащения рудного сырья.

Актуальными задачами на ближайшие десятилетия являются разработка достоверных воспроизводимых методов определения физико-механических характеристик рудного сырья, необходимых и достаточных для построения математических моделей и разработка методов обработки результатов моделирования, в том числе для снижения энергопотребления и эксплуатационных расходов рудоподготовительных процессов, повышения производительности и улучшения гранулометрического состава питания последующих операций обогащения.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в решение задач, связанных с оптимизацией циклов измельчения, моделирования процессов дезинтеграции и тестирования рудного сырья внесли многие отечественные и зарубежные исследователи, среди которых следует отметить Ю.Э. Аккермана, С.Е. Андреева, Е.Е. Андреева, В.Ф. Баранова, Л.Ф. Биленко, А.В. Бортникова, Л.А. Вайсберга, Г.И. Газалееву, В.И. Кармазина, В.А. Перова, А.В. Потапова, К.А. Разумова, В.А. Олевского, П.В. Малярова, О.Н. Тихонова, К.В. Федотова, В.А. Чантурия, Ф. Бонда, А. Дж. Линча, С. Моррелла, Т.Дж. Напиер-Мунна, Ч.А. Роуланда, Дж. Старки, Р.Т. Хукки и др., а так же коллективы АО "Механобр инжиниринг", АО «Уралмеханобр», ООО «Институт ГИПРОНИКЕЛЬ», JKTech Pty Ltd, SMC Testing Pty Ltd и др.

Признанными в мировой и отечественной практике подходами к повышению эффективности процессов дезинтеграции рудного сырья являются работы Бонда, Моррелла и института Механобр. При выборе типоразмера, рабочих параметров оборудования и моделирования схем рудоподготовки широкое распространение получили следующие компьютерные пакеты: JKSimMet, USIMPAC, Bruno и др. Всё большую популярность набирает программное обеспечение ANSYS Fluent, CFDEM, Rocky DEM и др., использующее методы дискретных элементов (DEM) и вычислительной гидродинамики (CFD).

Цель работы. выбор и обоснование режима работы мельницы мокрого полусамои измельчения, обеспечивающего увеличение производительности и снижение удельных энергетических затрат на переработку сульфидных медно-никелевых руд при сохранении требуемой крупности готового продукта измельчения.

Идея работы заключается в разработке комплексного метода, включающего набор лабораторных испытаний, необходимых и достаточных для имитационного и фундаментального моделирования процессов рудоподготовки сульфидных

медно-никелевых руд в целом и мокрого полусамоизмельчения в частности.

Задачи исследования:

1. Анализ методов математического моделирования и программного обеспечения для моделирования рудоподготовительных аппаратов и схем, обоснование их применения для выполнения цели диссертационного исследования.

2. Анализ методов определения физико-механических свойств рудного сырья, необходимых для моделирования рудоподготовительных процессов.

3. Определение физико-механических свойств объекта исследования, достаточных для моделирования рудоподготовительных процессов.

4. Разработка ориентированной на перерабатываемое сырье математической модели существующей мельницы полусамоизмельчения, достоверно описывающей ее работу.

5. Оценка эффективности процесса полусамоизмельчения, расчет требуемых энергетических затрат на разрушение сульфидных медно-никелевых руд при заданной производительности и требуемом гранулометрическом составе.

Методология и методы исследований. Методология носит экспериментально – теоретический характер и включает современные методы определения физико-механических характеристик рудного сырья, изучение методов симуляции процессов дезинтеграции рудного сырья и компьютерного моделирования рудоподготовительных схем (фундаментальное и имитационное моделирование), лабораторные исследования для определения физико-механических свойств перерабатываемого сырья (методики DWT, SMC тестов, рабочего индекса шарового измельчения Бонда), моделирование процессов рудоподготовки в программном обеспечении Rocky DEM и JKSImMet, обработку полученных результатов современными методами вычислительной математики и прикладной статистики.

Научная новизна работы

1. Предложена модифицированная методика определения

рабочего индекса Бонда BWI , использующая мельницу МШЛ-14 в шаровом тесте Бонда, с помощью коэффициента соотношения чистой мощности измельчения в уравнении Бонда для определения индекса BWI .

2. Экспериментально установлена взаимосвязь физико-механических параметров M_{ia} , M_{ic} , M_{ih} , DW_i , $SCSE$, t_a от A , b и SG , что позволяет минимизировать количество тестовых процедур, необходимых для расчета и моделирования циклов рудоподготовки.

3. Разработана и проверена на трех типах сульфидной медно-никелевой руды (богатой, медистой и вкрапленной) методика определения минимальной удельной энергии разрушения частиц, которая позволяет получить данные, необходимые для обработки результатов численного моделирования процесса мокрого полусамоизмельчения.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Показано, что физико-механические параметры, определяемые в тестах DWT и SMC обладают взаимным влиянием, при этом ключевыми являются показатели A , b (характеризующие высокоэнергетическое ударное разрушение рудного сырья) и объемная плотность SG , что позволяет аналитически рассчитать из них все остальные выходные данные тестов (индекс ударного разрушения DW_i , энергетические индексы M_{ia} , M_{ic} , M_{ih} , $SCSE$ и параметр низкоэнергетического разрушения t_a).

2. Предложена экспериментально обоснованная модифицированная методика, позволяющая определять рабочий индекс шарового измельчения Бонда BWI с помощью мельницы МШЛ-14 при относительной ошибке не более 4,5 %.

3. Обоснована значимость минимальной удельной энергии разрушения частиц различной крупности для обработки результатов численного моделирования процесса мокрого полусамоизмельчения, что позволяет спрогнозировать рост производительности мельницы МПСИ 10,36х5,18 на 4,1 % и снижение удельного энергопотребления на 1,2 % при переходе на рекомендуемый режим работы (замене диаметра шара с 125 на 110 мм, повышении содержания твердой фракции в питании мельницы с 65 до 70 %, изменениях скорости

вращения барабана с 72,0 до 73,1 % от критической и степени заполнения измельчающей средой с 11 до 12 %).

4. Разработанный комплексный метод оценки эффективности процессов измельчения сульфидных медно-никелевых руд может быть рекомендован к внедрению в научно-исследовательскую, образовательную и производственную практику, связанную с технологическими изысканиями в области измельчения рудного сырья.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Применение модифицированной методики определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда и DWT (теста падающего груза) позволяет сократить количество тестовых процедур и специализированного оборудования для получения комплекса физико-механических показателей измельчаемости рудного сырья.

2. Обосновано, что определение минимальной удельной энергии разрушения частиц рудного сырья различных классов крупности позволяет оценить эффективность работы мельницы полусамои измельчения в многофазной DEM-CFD модели и определить предпочтительные режимы её работы.

Связь темы диссертации с научно-техническими программами, отраслевыми планами министерств и т.д.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утв. Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899). Ее направленность отвечает стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (Распоряжение Правительства от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части повышения эффективности освоения месторождений путем внедрения современных технологий переработки, обогащения и комплексного извлечения полезных ископаемых.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, обеспечивается методологической базой, включающей широкий спектр стандартизированных лабораторных исследований,

анализом существующих баз результатов испытаний физико-механических свойств рудного сырья, применением современных методов статистической обработки экспериментальных данных и результатов математического моделирования на основе специализированных программных комплексов, характеризующихся удовлетворительной сходимостью. Применимость результатов работы подтверждается актом внедрения результатов исследования в АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» (№21/015 от 19.03.2021 г.).

Апробация работы проведена на следующих научно-практических мероприятиях:

1. Международная научно-практическая конференция «BHT – FREIBERGER UNIVERSITÄTSFORUM 2018 «Future Materials – Safe Resources Supply – Circular Economy» (Германия, г. Фрайберг, 2018 г.).

2. Международная научно-практическая конференция «XXIX Международный конгресс обогатителей IMPC 2018» (г. Москва, 2018 г.).

3. II Всероссийская научно-практическая конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.).

4. III Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 11 работах, в том числе 3 входят в перечень ведущих рецензируемых изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки (далее – Перечень ВАК), 4 в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора в получении научных результатов заключается в изучении отечественных и зарубежных источников по проблеме исследования; разработке идеи, постановке цели и реализации соответствующих задач исследования; формулировке и обосновании защищаемых положений; разработке методик

определения физико-механических свойств рудного сырья, необходимых и достаточных для расчета, имитационного и фундаментального моделирования рудоподготовительных процессов по переработке сульфидных медно-никелевых руд; проведении комплекса экспериментальных исследований; разработке методики оценки эффективности процессов измельчения и рекомендуемого режима работы мельницы МПСИ 10,36х5,18.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 27 таблиц и 4 приложения.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллективам кафедр обогащения полезных ископаемых и металлургии Санкт-Петербургского горного университета, сотрудникам компании АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс» за оказанную поддержку и научное консультирование на протяжении всей работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен литературный обзор теории рудоподготовительных процессов и математического моделирования: законы дробления, имитационное и фундаментальное моделирование.

Во второй главе представлен перечень существующих методик определения физико-механических свойств рудного сырья для процессов измельчения. Установлены взаимосвязи ряда физико-механических параметров, позволяющие сократить перечень тестовых испытаний, необходимых для выбора, расчета оборудования и имитационного моделирования циклов рудоподготовки. Модифицированы методики Ахмади, Карра и Капура для определения индекса Бонда *BWI*. Разработана модифицированная методика определения индекса Бонда *BWI* по

результатам измельчения в мельнице МШЛ-14. Разработан комплекс калибровочных испытаний для нахождения параметров контактных моделей в DEM-CFD моделировании. Разработана методика определения минимальной удельной энергии разрушения частиц различной крупности.

В третьей главе представлено практическое применение энергетических индексов, получаемых с помощью комплекса лабораторных испытаний физико-механических свойств рудного сырья, изложенных во второй главе. Показан методологический подход к расчету и выбору основного технологического оборудования основанный на удельном расходе электроэнергии цикла рудоподготовки. На основе имитационного моделирования в программном обеспечении JKSImMet разработана технология рудоподготовки для переработки технологической пробы сульфидной медно-никелевой руды.

В четвертой главе описан подход к построению многофазной модели мельницы полусамоизмельчения МПСИ 10,36х5,18 методом дискретных элементов. Разработан метод обработки результатов моделирования, позволяющий прогнозировать потребляемую мощность, производительность и удельный расход электроэнергии. Разработан рекомендованный режим работы исследуемой мельницы, позволяющий повысить производительность с 1250 до 1301 т/ч (+4,1 %) при снижении удельного энергопотребления с 6,42 до 6,34 кВт·ч/т (-1,24 %) и сохранении заданной крупности продукта измельчения.

В заключении даны обобщенные выводы по результатам диссертационного исследования.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение модифицированной методики определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда и DWT (теста падающего груза) позволяет сократить количество тестовых процедур и специализированного оборудования для получения комплекса физико-механических показателей измельчаемости и дробимости рудного сырья.

Рабочий индекс шарового измельчения Бонда (индекс BWI) – это параметр измельчения, который выражает сопротивляемость материала шаровому измельчению. Численно величина индекса BWI равна расходу электроэнергии, необходимой для измельчения от теоретически бесконечной крупности исходного питания до крупности 80% менее 106 мкм.

Были исследованы предлагаемые зарубежными учеными модификации определения индекса BWI , направленные на снижение трудозатрат тестирования и/или отказа от использования мельницы Бонда. Для трех методик (Ахмади Р., Карра В.К. и Капур П.К.) представлены модификации, позволяющие снизить относительную ошибку результата тестирования.

На основании проведенных экспериментально-теоретических исследований было установлено, что замена мельницы Бонда на широко используемую в отечественной лабораторной практике мельницу МШЛ – 14 при проведении теста шарового измельчения Бонда является достаточно перспективным направлением.

Разработана и проверена на четырех типах руды (золотосульфидной, сульфидной медно-никелевой, медной и окисленных железистых кварцитах) модифицированная методика определения индекса BWI , использующая мельницу МШЛ-14. Основными отличиями при проведении опытов измельчения в мельнице МШЛ-14, по сравнению с опытами в шаровой мельнице Бонда, является масса шаровой загрузки (12,758 и 20,125 кг соответственно) и объем пробы в питании (444 и 700 мл соответственно). В остальном порядок проведения лабораторных испытаний аналогичен методике Бонда. При проведении циклов измельчения измерялась чистая мощность процесса измельчения, потребляемая каждой из мельниц (мельница МШЛ-14 – 81,5 Вт, мельница Бонда – 144,5 Вт).

Основываясь на третьем законе Бонда, гипотеза, выдвинутая соискателем, состоит в том, что уравнение, использующееся при расчете индекса BWI , может быть изменено со стандартного (1):

$$BWI = \frac{1,1023 \cdot 44,5}{A^{0,23} \cdot G_{bp}^{0,82} \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)}, \text{ кВтч/т}, \quad (1)$$

на модифицированное (2):

$$BWI = \frac{1,1023 \cdot 44,5}{A^{0,23} \cdot G_{bp}^{0,82} \cdot 10 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \cdot \frac{N_{\text{МШ}}}{N_{\text{Бонд}}} \text{ кВтч/т}, \quad (2)$$

где A – размер ячейки контрольного сита, мкм; G_{bp} – параметр измельчаемости в последних трех циклах теста, г/об; F_{80} – размер ячейки сита, через которое проходит 80% исходной пробы, мкм; P_{80} – размер ячейки сита, через которое проходит 80% продукта измельчения, мкм. $N_{\text{МШ}}$ – чистая мощность при шаровом измельчении, потребляемая мельницей МШЛ-14, Вт; $N_{\text{Бонд}}$ – чистая мощность при шаровом измельчении, потребляемая мельницей Бонда, Вт. Чистая мощность рассчитывается как разница между мощностью, потребляемой приводом мельницы при загрузке рудой и шарами и мощностью холостого хода.

Модифицированная формула расчета индекса BWI (2), учитывающая соотношение в чистой мощности измельчения, показала высокую сходимость результатов: относительная ошибка определения индекса BWI по данной методике не превысила 4,5 % для четырех исследованных проб, см. рисунок 1.

Предложена блок-схема выбора альтернативных методик определения индекса BWI (см. рисунок 2) в зависимости от целей и условий, стоящих перед исследователем.

Вторая часть данного исследования посвящена анализу баз данных прочностных свойств различного рудного сырья, содержащих в совокупности более 3300 тестов. Установлена зависимость физико-механических параметров M_{ia} , M_{ic} , M_{ih} , DW_i , $SCSE$, t_a от A , b и SG (см. рисунки 3-6 и формулы 3-9), что позволяет получить полные результаты SMC теста из результатов теста DWT.

$$DW_i = 92,56 \cdot SG \cdot (A \cdot b)^{-0,977} \quad (3)$$

$$SCSE = 52,74 \cdot (A \cdot b)^{-0,441} \quad (4)$$

$$t_a = 2,6132 \cdot (DWT)^{-1} \quad (5)$$

$$M_{ia} = 390 \cdot (A \cdot b)^{-0,813} \quad (6)$$

$$M_{ic} = 303,5 \cdot (A \cdot b)^{-1} \quad (7)$$

$$M_{ih} = 577 \cdot (A \cdot b)^{-1} \quad (8)$$

$$M_{ib} = BWI \cdot 1,86 - 8,7 \quad (9)$$

где DW_i – индекс падающего груза, являющийся мерой прочности горной породы при ударном разрушении, кВтч/м³; SG – объемная плотность, т/м³; A , b – параметры, характеризующие высокоэнергетическое ударное разрушение; $SCSE$ – удельная энергия цикла измельчения МПСИ с додрабливанием критического класса, кВт-ч/т; M_i – параметр (индекс Моррелла) являющейся общим обозначением для группы из четырех индексов: для традиционного дробления и измельчающих валках высокого давления индексы обозначаются M_{ic} и M_{ih} соответственно; для грубого измельчения продукта до $P_{80} = 750$ мкм — M_{ia} ; для тонкого измельчения от $P_{80} = 750$ мкм до P_{80} , достигаемых при обычном шаровом измельчении — M_{ib} . Индекс тонкого измельчения M_{ib} определяется из результатов теста Бонда для шарового измельчения, индексы M_{ia} , M_{ic} и M_{ih} — из результатов теста SMC.

Используя модифицированную методику определения индекса BWI и применяя зависимости 3-9 к результатам теста падающего груза DWT, представлены:

1. Выбор основного рудоподготовительного оборудования по показателям удельного энергопотребления цикла;
2. Разработанная технология рудоподготовки (см. рисунки 7-8) для переработки пробы сульфидной медно-никелевой руды, выполненная с помощью имитационного моделирования в программном обеспечении JKSimMet.

Таким образом, модифицированная методика определения индекса BWI с применением мельницы МШЛ-14 и теста падающего груза DWT в совокупности с полученными зависимостями физико-механических параметров M_{ia} , M_{ic} , M_{ih} , DW_i , $SCSE$, t_a от параметров A , b и SG , позволяют сократить перечень необходимого оборудования и лабораторных испытаний для получения параметров, использующихся для расчета рудоподготовительных циклов по удельным энергозатратам, выбора оборудования и имитационного моделирования в программном обеспечении JKSimMet.

2. Обосновано, что определение минимальной удельной энергии разрушения частиц рудного сырья различных классов крупности позволяет оценить эффективность работы мельницы

полусамоизмельчения в многофазной DEM-CFD модели и определить предпочтительные режимы её работы.

В данном исследовании представлен подход к построению многофазной DEM-CFD модели (метод дискретных элементов DEM и вычислительной гидродинамики CFD) процесса полусамоизмельчения сульфидной медно-никелевой руды, валидации модели и обработки полученных результатов моделирования. Объектом исследования послужила шихта богатой M1, медистой M2 и вкрапленной T1 руд, перерабатываемых на предприятии аналоге в мельнице МПСИ 10,36х5,18. Построение и расчет моделей осуществлялся в программном обеспечении Rocky DEM и Ansys Fluent. В таблице 1 отражены основные характеристики процесса полусамоизмельчения.

Таблица 1 – Исходные данные для DEM-CFD моделирования

Параметр	Величина	Ед. изм.
Ширина расчетной зоны	500	мм
Степень заполнения мелящими телами	11	%
Диаметр шаров	125	мм
Общая масса шаров	17,123	т
Общая степень заполнения	24	%
Масса руды T1	4,375	т
Масса руды M1	5,000	т
Масса руды M2	3,123	т
Содержание твердого в пульпе	65	%
Скорость вращения барабана	9,4538	мин ⁻¹
Форма частиц руды – многогранник	10	вершин
Класс крупности руды	-130 +5	мм

Для достижения высокой сходимости результатов моделирования DEM с экспериментальными данными, был разработан комплекс калибровочных лабораторных испытаний, предназначенных для нахождения коэффициентов, регулирующих модели контактного взаимодействия частиц друг с другом и с рабочими поверхностями при DEM моделировании. К калибровочным испытаниям была подготовлена представительная проба исследуемой шихты в соответствии с пропорцией исследуемых

типов руд для периода января-декабря 2019 г на предприятии - аналоге. Длительность модельного времени составила 20 с. Число частиц в модели – 74 тыс. Общая динамика материала в мельнице (а) и распределение массовой доли жидкой фазы в объеме (b) представлены на рисунке 9.

Основным инструментом при анализе результатов является набор энергетических спектров для исследуемых классов крупности руды в мельнице (рисунок 10). Энергетический спектр – это распределение величины полной удельной мощности (кВт/т), приходящейся на удары различной удельной энергии (кВт·ч/т) по узким классам крупности частиц перерабатываемого рудного сырья.

Для каждого узкого j -го класса крупности характерна своя средняя величина удельной минимальной энергии $E_{cs(j)}^{0,95}$, необходимой для разрушения частицы. Чем крупнее частица, тем ниже удельная энергия удара, необходимая для её разрушения. Была разработана методика определения величины $E_{cs(j)}^{0,95}$ различных классов крупности исследуемой шихты. В качестве лабораторной установки для проведения исследования был использован тестер падающего груза, применяемый в методологии тестов DWT и SMC. Для испытания отбирались классы крупности -75,0 +63,0; -53,0 +45,0; -37,5 +31,5; -26,5 +22,4 мм. В каждый класс крупности отбиралось 20 частиц, после чего они поочередно подвергались ударному разрушению путем сбрасывания легкой базы теста DWT (~2,7 кг). Сбрасывание груза производилось с высоты 50 мм от поверхности частицы с добавлением по 10 мм на каждое следующее сбрасывание вплоть до разрушения частицы. Высота, достигнутая при разрушении фиксировалась и частица заменялась на следующую из набора. Средняя удельная энергия разрушения частиц каждого набора определяется в соответствии с уравнением (10):

$$E_{cs(j)}^{0,5} = \frac{Q_w \cdot h_j \cdot g}{3,6 \cdot Q_{pj}}, \text{ кВт·ч/т} \quad (10)$$

где $E_{cs(j)}^{0,5}$ – минимальная удельная энергия соударения, при которой с вероятностью 0,5 произойдет разрушение частицы в j -ом наборе, кВт·ч/т; Q_w – масса груза, кг; h_j – средняя высота падения груза, при которой происходит разрушение частиц в j -ом наборе, м; Q_{pj} –

средняя масса частиц в j -ом наборе, г; g – ускорение свободного падения, м/с².

Учитывая нормальное распределение, номинальная удельная энергия разрушения частиц каждого набора определяется в соответствии с уравнением (11):

$$E_{cs(j)}^{0,95} = E_{cs(j)}^{0,5} + 2\sigma_j, \text{ кВтч/т}, \quad (11)$$

где $E_{cs(j)}^{0,95}$ – удельная энергия удара, с вероятностью 0,95 приводящая к разрушению частиц из j -ой выборки, кВт-ч/т; σ_j – среднее квадратическое отклонение достигнутой удельной энергии разрушения E_{cs} в j -ой выборке частиц.

Согласно представленной выше методике, для исследованных технологических проб руд М1, М2 и Т1 были получены зависимости минимальной удельной энергии разрушения частиц от их крупности (рисунок 11). Полученная таким образом величина минимальной удельной энергии разрушения частиц $E_{cs(j)}^{0,95}$ «отсекает» на энергетическом спектре j -го класса крупности полезные соударения, происходящие в мельнице, от тех, при которых не происходит разрушения материала.

Таким образом, общая мощность, передающаяся на j -ый класс крупности, может быть разбита на две составляющие (12):

$$W_{s(j)} = W_{l(j)} + W_{u(j)}, \text{ кВт/т} \quad (12)$$

где $W_{s(j)}$ – это общая удельная мощность j -го класса крупности, кВт/т; $W_{l(j)}$ – удельная мощность j -го класса крупности, совершаемая ударами, не приводящими к разрушению частиц, кВт/т; $W_{u(j)}$ – полезная удельная мощность j -го класса крупности, совершаемая ударами, приводящими к разрушению частиц, кВт/т;

Выразить общую эффективность процесса измельчения можно как средневзвешенную по всем классам крупности полноту передачи общей потребляемой мощности в контактное взаимодействие частиц в диапазоне удельных энергий, приводящих к их разрушению по уравнению (13):

$$E_{en.gr} = \sum_{n=1}^j \frac{W_{u(j)} \gamma_j}{W_{s(j)}}, \% \quad (13)$$

Таким образом, определив минимальную удельную энергию разрушения частиц $E_{cs(j)}^{0,95}$ во всём диапазоне крупности материала расчетным путём из полученных зависимостей, можно обработать данные энергетических спектров и определить общую эффективность процесса полусамоизмельчения при заданных условиях.

Используя полученную модель мельницы МПСИ 10,36х5,18, был разработан рекомендуемый режим её работы, заключающийся в снижении диаметра загружаемого шара с 125 до 110 мм, повышении содержания твердой фракции в пульпе с 65 до 70 %, изменении скорости вращения барабана с 72 до 73,1 % от критической и изменении степени заполнения барабана мельницы дробящей средой с 11 до 12 %. Рекомендуемый режим обеспечивает увеличение производительности мельницы с 1250 до 1301 т/ч (+4,1 %) и снижение удельных энергетических затрат с 6,42 до 6,34 кВт·ч/т (-1,24 %) при сохранении заданной крупности продукта измельчения, что является достижением основной цели исследования (таблицу 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно – квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – выбора и обоснования режима работы мельницы мокрого полусамоизмельчения, обеспечивающего увеличение производительности и снижение удельных энергетических затрат на переработку сульфидных медно-никелевых руд при сохранении требуемой крупности готового продукта измельчения.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Выполнен анализ теории рудоподготовительных процессов и математического моделирования: законов дробления Риттенгера, Кирпичева-Кика, Бонда и Моррелла, модели разрушения Ab-t10, методов определения физико-механических свойств для характеристик рудного сырья, имитационного и фундаментального моделирования.

2. Проведен анализ альтернативных методик определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда. Для трех методик представлены модификации, позволяющие снизить относительную ошибку тестирования: для методики Капура, за счет использования коэффициентов, подобранных для трех типов руд, относительная ошибка снижена с 8,6 % до 3,5 %; для методики Карра за счет увеличения циклов измельчения с двух до четырех относительная ошибка снижена с 5,5 % до 1,3 %; для методики Ахмади за счет использования числа оборотов мельницы в первом цикле, выбранном по базе данных прочностных свойств рудного сырья схожего происхождения, относительная ошибка снижена с 7 % до 3,5 %. Разработана модифицированная методика определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда с использованием мельницы МШЛ-14. Относительная ошибка разработанной методики составила не более 4,5%. Разработана блок-схема для выбора альтернативного метода определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда в зависимости от исходных условий, стоящих перед исследователем.

3. Разработан метод лабораторного определения номинальной удельной энергии разрушения частиц рудного сырья в различных классах крупности с помощью тестера падающего груза DWT.

4. Разработан комплекс лабораторных калибровочных испытаний, позволяющий определить полный перечень параметров контактных моделей, необходимых для построения методом дискретных элементов верифицированной модели процесса полусамоизмельчения в ПО Rocky DEM.

5. По базе проведенных испытаний кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета и баз из открытых источников, содержащих в совокупности результаты более 3300 тестов рудного сырья различного происхождения, определена взаимосвязь физико-механических параметров M_{ia} , M_{ic} , M_{ih} , DW_i , $SCSE$, t_a от A , b и SG . Основываясь на полученных зависимостях, показано, что тесты шарового измельчения Бонда, падающего груза DWT, определение номинальной удельной энергии разрушения руды и разработанный комплекс калибровочных

испытаний являются необходимыми и достаточными для расчета и выбора оборудования, имитационного и фундаментального моделирования процессов рудоподготовки сульфидных медно-никелевых руд в целом и мокрого полусамоизмельчения в частности.

6. Используя разработанный комплексный метод оценки эффективности измельчения сульфидных медно-никелевых руд, построена численная DEM-CFD модель мокрого полусамоизмельчения шихты богатых, медистых и вкрапленных сульфидных медно-никелевых руд в мельнице МПСИ 10,36х5,18. Оценена эффективность процесса полусамоизмельчения как полнота передачи мощности, потребляемой на движение мельничной загрузки, в соударения частиц руды с удельной энергией, достаточной для их разрушения.

7. Выбран и обоснован переход на рекомендуемый режим работы мельницы МПСИ 10,36х5,18, заключающийся в снижении диаметра загружаемого шара с 125 до 110 мм, повышении содержания твердой фракции в пульпе с 65 до 70 %, изменениях в скорости вращения барабана с 72 до 73,1 % от критической и степени заполнения барабана мельницы измельчающей средой с 11 до 12 %. Разработанный рекомендуемый режим обеспечивает увеличение производительности мельницы с 1250 до 1301 т/ч (+4,1 %) и снижение удельных энергетических затрат с 6,42 до 6,34 кВт·ч/т (-1,24 %) при сохранении заданной крупности продукта измельчения, что является достижением основной цели исследования.

8. Разработанный комплексный метод оценки эффективности измельчения является универсальным и может быть применен для различного рудного сырья.

9. Результаты диссертации в дальнейшем могут быть использованы в качестве основы для разработки и проектирования комплексных решений по моделированию рудоподготовительных процессов с целью их оптимизации, построения цифровых двойников, поиска способов модернизации существующих переделов рудоподготовки сульфидных медно-никелевых руд.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Львов, В.В. Система безопасного управления процессом гидроклассификации минерального сырья / В.В. Львов, **Л.С. Читалов** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2017. - №4 (специальный выпуск 5-2). – М.: Издательство «Горная книга». С. 239-244. ISSN: 0236-1493.

2. Львов, В.В. Сравнительная оценка методов определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда / В.В. Львов, **Л.С. Читалов** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2021. - №1. - М.: Издательство «Горная книга». С. 130-145. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-130-145. (МБДиСЦ: Scopus).

3. Современные тенденции подходов к расчету рудоподготовительных процессов и аппаратов для переработки руд цветных металлов / В.В. Львов, **Л.С. Читалов** // «Цветные металлы». - 2020. - № 10. – М.: Издательство «Руда и Металлы». С. 20-26. ISSN 0372-2929. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03 (МБДиСЦ: Scopus).

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

4. Lvov, V. Semi-Autogenous Wet Grinding Modeling with CFD-DEM / V. Lvov, **L. Chitalov** // Minerals, 2021, 11, P. 485-501. <https://doi.org/10.3390/min11050485>.

Свидетельства:

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2020611453, Российская Федерация. Программа для определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда: №2020610187 : заявл. 10.01.2020 : опубл. 30.01.2020 / **Л.С. Читалов**, В.В. Львов; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»». – 1 с.

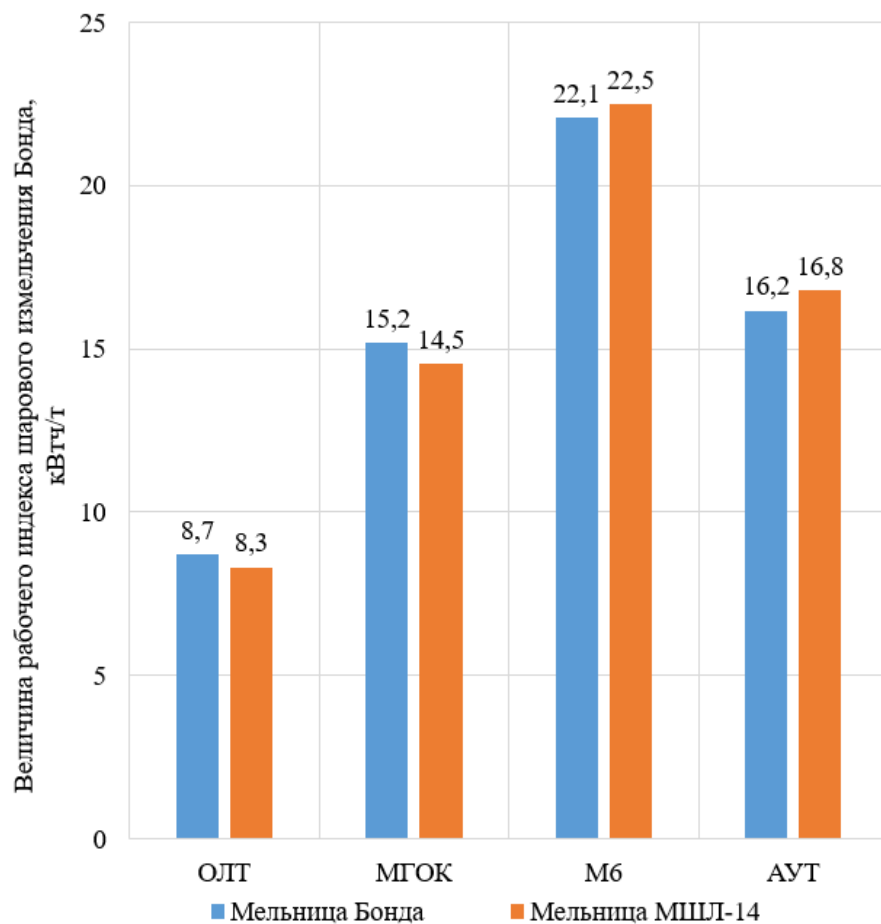


Рисунок 1 – Результаты определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда по модифицированной методике в мельнице МШЛ-14 и мельнице Бонда



Рисунок 2 – Блок-схема выбора альтернативной методики определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда

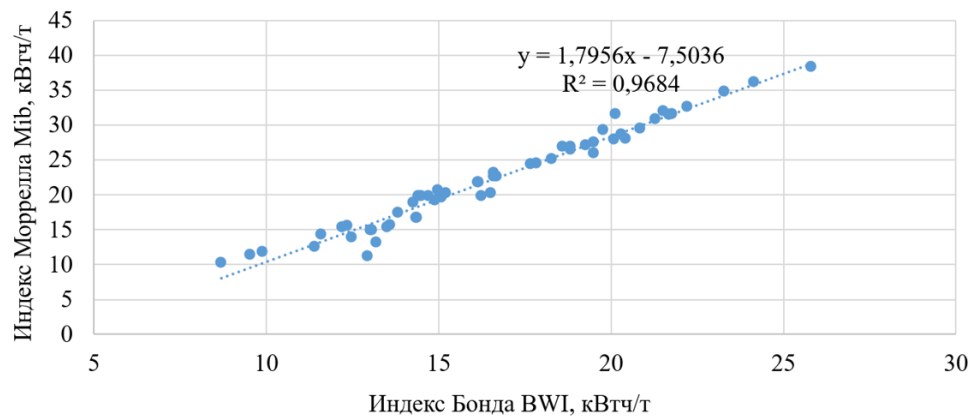


Рисунок 3 – Зависимость индекса тонкого измельчения Моррелла M_{ib} от рабочего индекса шарового измельчения Бонда BWI

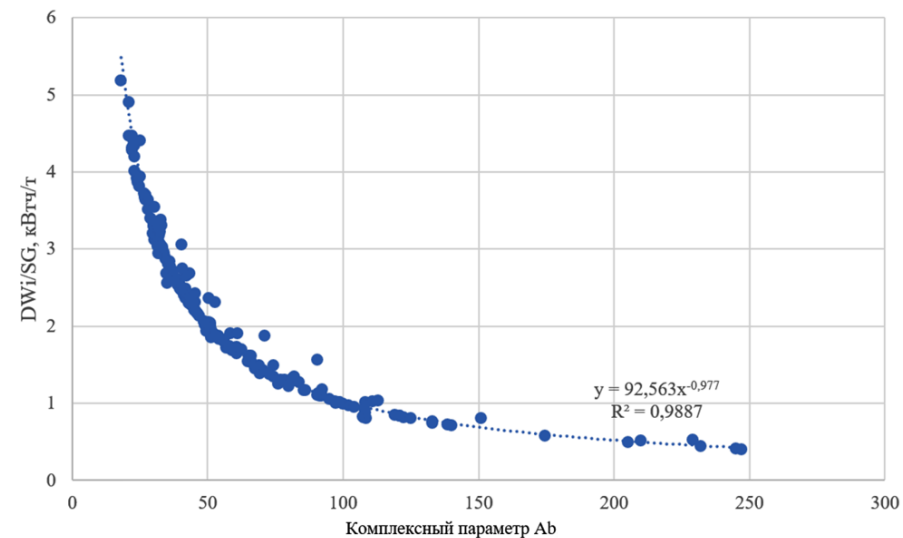


Рисунок 5 – Зависимость параметра DWi/SG от комплексного параметра $A \cdot b$

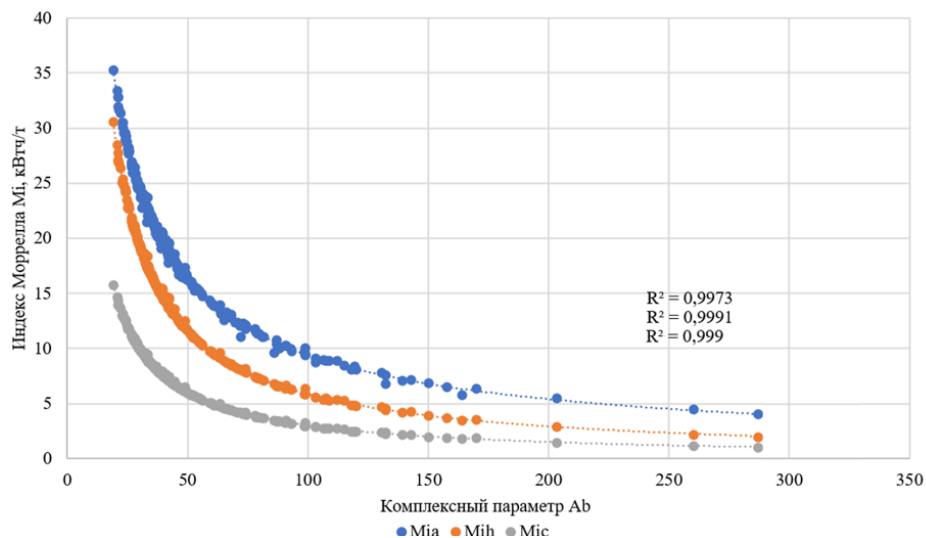


Рисунок 4 – Зависимость индексов Моррелла M_{ia} , M_{ic} и M_{ih} от комплексного параметра $A \cdot b$

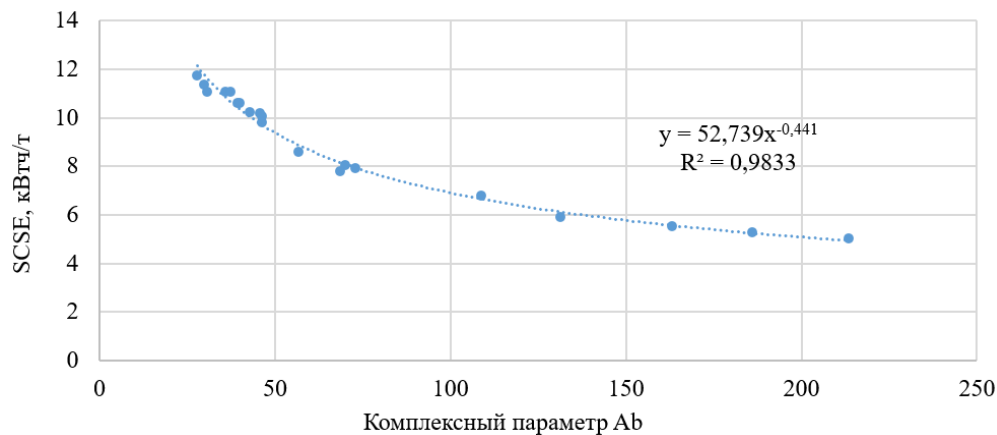


Рисунок 6 – Зависимость параметра $SCSE$ от комплексного параметра $A \cdot b$

Исходная руда	
913,240	758,987
560,270	564,728
100,000	45,000

Рисунок 7 – Качественно-количественная схема крупного дробления сульфидной медно-никелевой руды

Выход, %	% твердого по массе
Производительность, т/ч	Плотность пульпы, т/м ³
Объем пульпы, м ³ /ч	Р80, мм
95% менее, мм	Сод. кл. -71 мкм

Rec - Solids (Sim)	% Solids (Sim)
TPH - Solids (Sim)	Pulp SG(Sim)
Volume Flow (Sim)	P80 (Sim)
95 % Passes [mm] (Sim)	% Passing 0.071 [mm] (Sim)

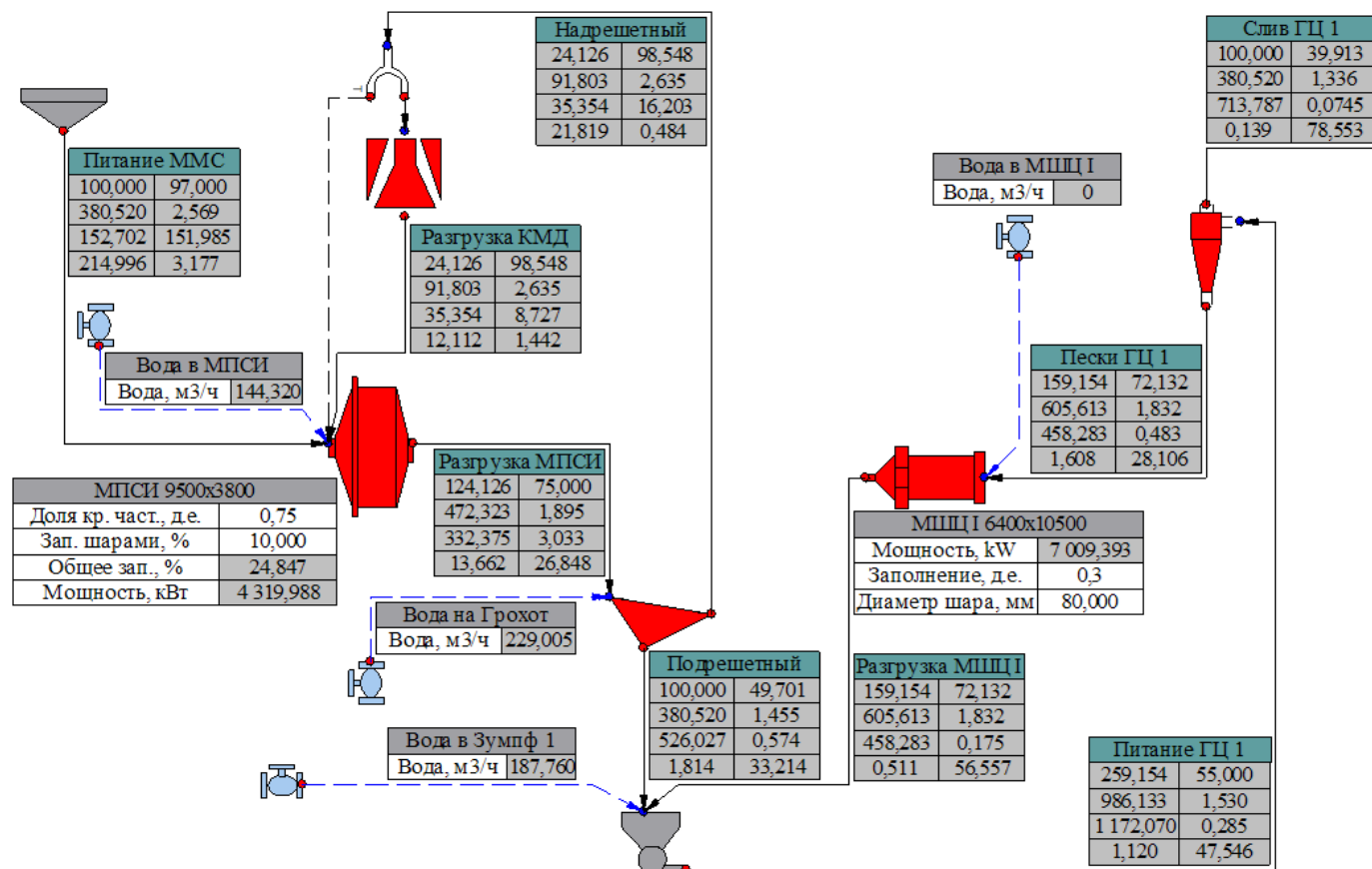


Рисунок 8 – Водно-шламовая схема переработки сульфидной медно-никелевой руды

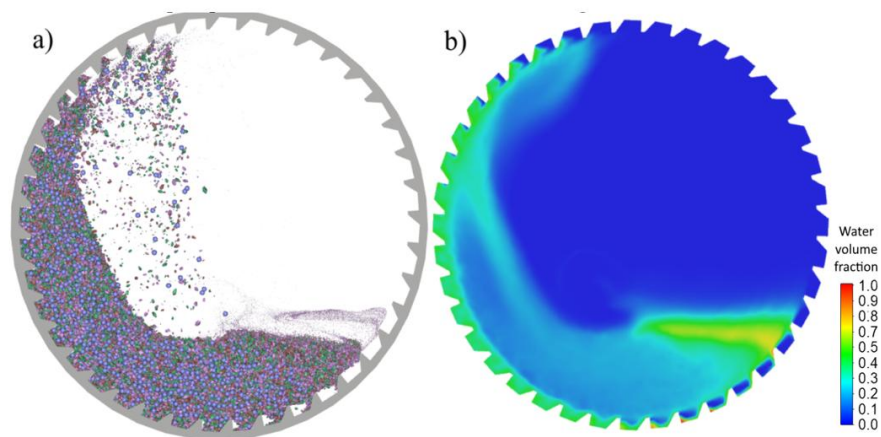


Рисунок 9 – Общая динамика материала в мельнице (a) и распределение массовой доли жидкой фазы в её объеме (b)

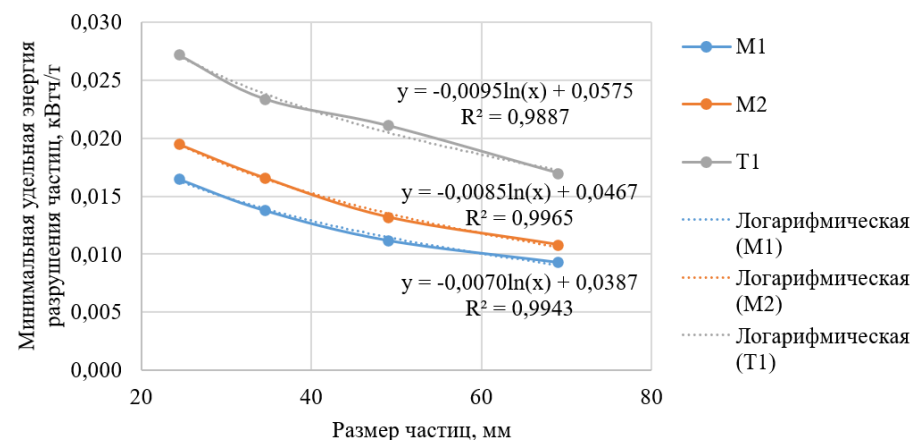


Рисунок 11 – Зависимость номинальной удельной энергии разрушения частиц от крупности

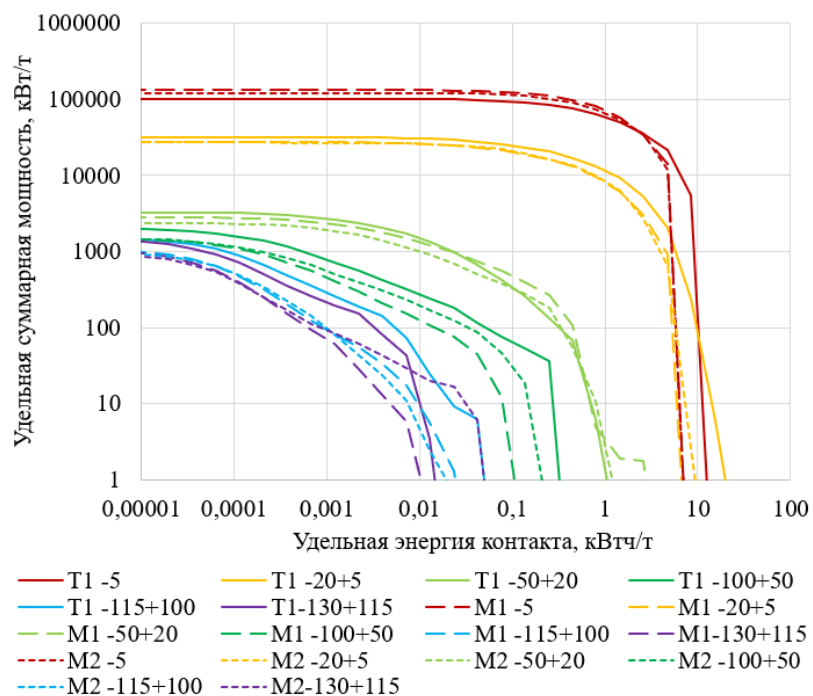


Рисунок 10 – Ударные энергетические спектры, полученные при моделировании

Таблица 2 – Прогнозируемые технологические показатели процесса полусамоизмельчения при переходе на рекомендуемый режим работы

Показатель	Существующий режим	Рекомендованный режим	Разница абс.	Разница, % _{отн}
Мощность, потребляемая приводом мельницы (модельная), кВт	8026,0	8251,5	225,5	+2,81
Мощность, потребляемая приводом мельницы (фактическая), кВт	8720,0	8965,0	245,0	+2,81
Производительность, т/ч	1250,4	1301,5	51,1	+4,09
Крупность подбударного продукта Т80, мкм	2690	2690	0	0
Удельный расход электроэнергии, кВтч/т	6,42	6,34	-0,06	-1,24
Расход электроэнергии на переработку 1 млн.т. руды, кВтч	6420000	6340000	-60000	-1,24