

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Винокуров Василий Романович

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНО-
РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МЕЛЬНИЦ
МНОГОКРАТНОГО УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
А.И. Матвеев

Якутск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. Современное состояние теории и практики измельчения.....	13
1.1 Общие теоретические представления по процессам разрушения рудных материалов.....	13
1.2 Процессы разрушения рудных материалов «свободным ударом».....	20
1.3 Новый способ дезинтеграции рудных материалов при ударном воздействии.....	24
1.4 Существующие аппараты дробления и измельчения с ударным принципом работы.....	28
1.4.1 Дробилки ударного действия.....	28
1.4.2 Мельницы ударного действия.....	32
1.4.3 Преимущества и недостатки ударных установок.....	36
ВЫВОДЫ.....	39
Глава 2. Разработка и сравнительные исследования центробежных мельниц многократного ударного действия с разной конструкцией рабочих органов.....	40
2.1 Принципиальные конструкции центробежных мельниц многократного ударного действия.....	40
2.1.1 Конструктивные особенности центробежной мельницы со ступенчатыми рабочими органами	41
2.1.2 Конструктивные особенности центробежной дисковой мельницы.....	44
2.1.3 Конструктивные особенности центробежной конусной мельницы.....	46
2.2 Методика исследований.....	47
2.2.1 Методика экспериментальных исследований на лабораторных центробежных мельницах многократного ударного действия.....	47

2.3 Исследования в лабораторной центробежной мельнице со ступенчатой формой рабочих органов.....	54
2.3.1 Влияние числа ступеней на эффективность измельчения.....	54
2.3.2 Взаимосвязь окружной скорости вращения рабочих органов с эффективностью измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице....	57
2.4 Исследования в лабораторной центробежной мельнице с конусной формой рабочих органов.....	61
2.5 Исследования в лабораторной центробежной мельнице с дисковой формой рабочих органов.....	65
2.6 Сравнительные лабораторные экспериментальные исследования по измельчению рудных материалов центробежными мельницами с разной конструкцией рабочих органов.....	67
ВЫВОДЫ.....	69
Глава 3. Методика расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного ударного действия и экспериментальные исследования в центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного действия.....	70
3.1 Существующие методы испытаний по разрушению рудных материалов.....	70
3.2 Лабораторные стендовые установки по изучению процессов разрушения.....	74
3.3 Разработка центробежного стенда для изучения разрушения частиц разной крупности и крепости.....	78
3.4 Методика расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного ударного действия.....	84
3.5 Зависимость эффективности измельчения рудных материалов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице от параметров рабочей камеры и скорости воздушного потока в ней при разных окружных скоростях вращения рабочих органов мельницы.....	92

3.6 Экспериментальные исследования по интенсификации измельчения в опытной лабораторной центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного действия за счет установки дополнительных отбойных элементов.....	96
3.7 Экспериментальные исследования по определению рационального количества отбойных элементов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного действия.....	99
ВЫВОДЫ.....	101
Глава 4. Результаты экспериментальных работ на опытно - промышленном образце центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.....	103
4.1. Разработка и создание опытно-промышленного образца центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.....	103
4.1.1 Методика экспериментальных исследований на опытно-полупромышленном образце центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.....	107
4.1.2 Результаты испытания центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 на месторождении Одолго.....	109
4.1.3 Результаты испытания центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 на месторождении Задержнинское	116
4.2 Исследования пылеобразования и разработка рекомендаций по пылеподавлению при работе центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.....	124
4.3 Исследование работы центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия ЦМВУ-800 при отрицательных температурах.....	127
4.4 Оценка энергетической эффективности опытно - промышленного образца центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.....	131
4.5 Разработка, испытание, исследование модели вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН.....	134

4.5.1 Экспериментальные исследования по определению рациональных рабочих параметров вертикального центробежного измельчителя.....	136
4.5.2 Экспериментальные исследования по определению зависимости эффективности измельчения рудных материалов разной твёрдости по шкале Мооса от угла разгрузки измельченного материала и частоты вращения рабочего органа измельчителя.....	144
ВЫВОДЫ.....	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	154
Список использованных источников.....	156
Приложение 1.....	178
Приложение 2.....	179
Приложение 3.....	180
Приложение 4.....	181
Приложение 5.....	182
Приложение 6.....	183
Приложение 7.....	184
Приложение 8.....	185
Приложение 9.....	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Процесс измельчения является самым энергоемким на горно-обогательном производстве. Доля энергетических затрат на процесс измельчения составляет до 50% всех затрат по переработке руд. Это обусловлено высокими требованиями к степени измельчения, связанными с тонкой вкрапленностью полезных ископаемых, низкой эффективностью применяемого измельчительного оборудования, КПД которых составляет в лучшем случае несколько процентов. Поэтому совершенствование измельчительного оборудования всегда было и остается важной задачей, требующей новых решений и подходов.

Одним из приоритетных направлений исследований является разработка малогабаритных и высокоэффективных измельчителей, наибольшее распространение среди которых получили центробежные мельницы ударного действия. Это связано с тем, что они менее энергозатратны, просты по конструкции и имеют небольшие габаритные размеры при относительно высокой производительности.

Большинство существующих ударных мельниц для измельчения рудных материалов в своих конструктивных решениях не учитывают многообразие физико-механических свойств измельчаемого сырья и реализуют ограниченные одно-двухактные механические воздействия, недостаточные для эффективного разрушения рудного материала. Повышение эффективности измельчения возможно в центробежных измельчителях многократного ударного действия, разработанных в ИГДС СО РАН, процессы разрушения руд в которых еще подробно не изучены.

В связи с вышеизложенным теоретические и экспериментальные исследования по разработке и обоснованию рациональных конструктивно-режимных параметров центробежных мельниц многократного ударного действия являются актуальными.

Степень разработанности темы. Изучению процессов разрушения горных пород, основ конструирования дробильно-измельчительного оборудования посвящены работы таких ученых как В. А. Бауман, П.А. Ребиндер, П. В. Ритгингер, А.В. Лисица, В. А. Кирпичев, Ю. А. Муйземнек, Ф. Бонд, Ф. Кик, А. К. Рундквист, Р. А. Родин, Л. А. Вайсберг, М. М. Протодьяконов, Л. И. Барон, Л.Ф. Биленко, А.И. Матвеев, П.М Сиденко, Б. В. Клушанцев и др.

Существенный вклад в области разрушения горных пород внес В.И. Ревнивцев. Он разработал и всесторонне обосновал концепцию селективной дезинтеграции руд, используя понятие геометрической и энергетической селективности дезинтеграции горных пород, что фактически означает разрушение по поверхностям раздела минеральных фаз при минимальных энергозатратах. Им были разработаны основные принципы рациональной организации раскрытия минеральных сростков при подготовке рудного сырья к обогащению, согласно которым для эффективного разрушения материала необходимо приложение многократных дозированных по величине нагрузок и применение различных методов разупрочнения руд, снижающих прочность контакта разноименных компонентов и облегчающих селективное раскрытие сростков.

Разработке и совершенствованию ударно-центробежных аппаратов посвящены работы Гарабажиу А.А., Осокина В.П., Сухановой А. С., Ваганова Ф. А., Левданского Э.И., Бальмонт Т. М., Гуюмджян П.П., Зубова В.В., Паладеевой Н.И. и др. В большинстве конструкций ударно-центробежного измельчительного оборудования разрушение частиц осуществляется за счет активации их движения и удара об неподвижные отражательные элементы, при которых реализуется одноактный вариант сообщения динамической нагрузки, что является недостаточно эффективным.

Объект исследования: центробежные мельницы многократного ударного действия для сухого измельчения рудных материалов с разными рабочими органами.

Предмет исследования: влияние конструкции рабочих органов центробежных мельниц и их режимных параметров на эффективность процесса измельчения.

Идея работы: повышение эффективности работы центробежных мельниц достигается за счет организации в их рабочих камерах многократных динамических воздействий на разрушаемые частицы в процессе измельчения.

Цель работы: разработка конструкции рабочих органов центробежных мельниц многократного ударного действия и обоснование их рациональных режимных параметров, позволяющих существенно повысить эффективность процесса измельчения рудных материалов.

Основные задачи исследований:

- провести анализ теоретических, экспериментальных исследований и разработок по совершенствованию центробежных мельниц ударного действия;
- разработать новые конструкции центробежных мельниц с разной формой рабочих органов, обеспечивающие многократные динамические воздействия и последовательное увеличение энергии на разрушаемые частицы;
- установить зависимости разрушения рудных частиц разной крепости и крупности от скорости столкновения с неподвижной преградой;
- провести экспериментальные исследования и установить зависимости эффективности измельчения кусковых рудных материалов различной механической прочности и крупности от окружной скорости противоположно вращающихся рабочих органов разной конструкции в лабораторных центробежных мельницах многократного ударного действия;
- разработать методику расчета рациональных режимных параметров работы рабочих органов центробежных мельниц многократного ударного действия для измельчения рудных материалов разной крупности и крепости.

Методы исследований: комплексный метод исследований, анализ и обобщение литературных и патентных источников; экспериментальные лабораторные исследования процессов сухой дезинтеграции горных пород в

мельницах многократного ударного действия; экспериментальные исследования на центробежном стенде по разрушению единичных кусковых материалов разной крепости и крупности; гранулометрический и фракционный методы анализа продуктов измельчения; методы планирования экспериментов, статистическая и аналитическая обработка результатов экспериментальных исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение эффективности разрушения рудных материалов в центробежных мельницах многократного ударного действия достигается за счет применения в них противоположно вращающихся рабочих органов специальной формы (ступенчатой, дисковой, конусной), позволяющих организовать рациональные условия интенсивности разрушения рудных материалов в рабочей камере, а также возможность последовательного увеличения скорости столкновения частиц с поверхностью рабочих органов по мере радиального перемещения материала в рабочей зоне измельчения от загрузки к разгрузке.

2. Разработана методика расчета скорости столкновения частиц с поверхностью рабочих органов центробежных мельниц многократного ударного действия в зависимости от заданной окружной скорости и геометрических параметров рабочих органов, позволяющая обосновать (определять) рациональные режимные и конструктивные параметры рабочих органов мельниц и прогнозировать степень разрушения частиц разной крупности и крепости.

Научная новизна работы:

1. На основе экспериментальных исследований установлено, что повышение эффективности измельчения рудных материалов достигается за счет применения многократных динамических воздействий в режиме последовательного повышения скорости столкновения частиц с поверхностью рабочих органов в процессе измельчения, компенсирующей уменьшение импульса динамического воздействия из-за сокращения размеров и массы частиц в процессе измельчения.

2. Установлено, что наиболее эффективное разрушение кусковых рудных материалов в центробежных мельницах многократного ударного действия

достигается за счет применения специальной ступенчатой конструкции рабочих органов: активатора и противоположно вращающегося отражателя.

3. Разработана математическая модель и методика расчета конечной скорости столкновения частицы с рабочими органами центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия в зависимости от заданной окружной скорости и геометрических параметров рабочих органов, что позволяет определять наиболее рациональные режимы работы мельницы для измельчения частиц различной крупности и крепости.

4. На основе экспериментальных данных установлены зависимости разрушения частиц разной крупности и крепости по выходу контрольного класса крупности $-0,071$ мм от конструктивных и режимных параметров рабочих органов центробежной ступенчатой мельницы, позволяющие прогнозировать эффективность их разрушения.

5. На основе ранних теоретических и экспериментальных исследований разработан и защищен патентами РФ ряд новых мельниц многократного ударного действия (патенты РФ: №2150323, патент РФ №2193447), которые были развиты автором в части подачи и получения патентов на изобретение РФ (№ 2209668, №2198028, № 2416463, № 2746502, №2365411, №2281809, № 2456100) и патента на полезную модель РФ (№ 94168).

Достоверность научных положений, выводов и результатов, приведенных в диссертации, подтверждается правильностью постановки задач, их успешным решением с применением современных методов исследований, а также обширным объемом экспериментальных исследований. Полученные расчетные данные сходятся с показателями, полученными при проведении экспериментов в лабораторных условиях, непротиворечивостью полученных результатов и выводов.

Практическая значимость. Испытания опытно-промышленного образца центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 показали возможность эффективного использования центробежных мельниц многократного ударного

действия в технологических схемах рудоподготовки при переработке руд месторождений Одолго, Задержнинское, а также при переработке рудных крупно-объемных проб месторождений (Люнкидали, Нежданинское, Малтан, Сентачан, Гурбей, Аркачан, Малый Тарын, Вертикальное). Разработанная методика расчета скорости столкновения частиц с рабочими органами центробежных мельниц многократного ударного действия может быть использована для определения их конструктивных параметров и рациональных режимов работы при проектировании оборудования. Результаты исследований и испытаний оборудования используются для учебного процесса по переработке и обогащению руд полезных ископаемых в СВФУ им. М.К. Аммосова.

Личный вклад автора состоит: в разработке конструкций центробежных мельниц многократного ударного действия и методики расчета режимных и конструктивных параметров их рабочих органов с учетом последовательного сокращения крупности кусковых рудных материалов в зависимости от их физико-механических свойств; в анализе полученных результатов и их интерпретации; в проведении экспериментальных работ; в статистической обработке данных.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны» (г. Якутск, 2005 г.), Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-корр. РАН Новопашина М.Д. «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России» (г. Якутск, 2011, 2015, 2017, 2019, 2021 гг.), Конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (г. Новосибирск, 2012 г.), X Конгрессе обогатителей СНГ (г. Москва, 2015 г.), VI Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых "Проблемы комплексного освоения георесурсов" (г. Хабаровск, 2016 г.), VIII Евразийском симпозиуме по проблемам прочности

материалов и машин для регионов холодного климата (г. Якутск, 2018 г.), IX Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (Якутск, 2019 г.), X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (г. Якутск, 2020 г.).

Публикации: Основные положения исследований отражены в 29 публикациях, в том числе в 16 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, в 5 изданиях, индексируемых в системе Scopus и Web of Science, 7 патентах РФ на изобретение и 1 патенте РФ на полезную модель.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 153 наименований и 9 приложений. Общий объем работы - 186 страниц машинописного текста, 77 рисунков, 40 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. А.И. Матвееву за идею научной работы, переданный опыт и знания в области переработки руд полезных ископаемых, к.т.н. К. Н. Большеву за ценные советы и консультации, коллективу лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН за помощь при выполнении настоящей работы.

1 Современное состояние теории и практики измельчения

1.1 Общие теоретические представления по процессам разрушения рудных материалов

Изучению процессов разрушения горных пород, как одному из основных процессов горного производства были посвящены работы многих исследователей. Наиболее фундаментальная часть работ была сделана в области механики разрушения. Разработки различных теорий прочности горных пород связаны с именами Р. Гука (1635-1703 гг.), Ш. Кулона (1736-1806 гг.), А. Навье (1785-1836 гг.), А. Сен-Венана (1797-1886 гг.), О. Мора (1835-1918) и других поздних исследователей, таких как Л.И. Барон, Ф. Бонд, П. Риттингер, М.М. Протодьяконов, А.А. Скочинский, И. Е. Хмельковский, Л.А. Вайсберг, Л.Ф. Биленко, П.М. Сиденко и др. [1-20].

Основополагающим принципом этих теорий является положение, что разрушение однородного и изотропного твердого тела происходит в тот момент, когда в какой-либо области (точке) тела параметры напряженно-деформированного состояния под действием внешних сил достигают некоторого критического значения.

Применительно к дезинтеграции горных пород на этом этапе исследований были разработаны три закона дробления, известные как гипотезы П. Риттингера, Ф. Кика и Ф. Бонда. По П. Риттингеру: «увеличение обнаженной поверхности прямо пропорционально силе, требующей для дробления». По Ф. Кику: «энергия, необходимая для получения аналогичных изменений конфигурации геометрически подобных тел одинакового технологического строения, изменяется, как веса или объемы этих сил», и обобщающая формула Ф. Бонда, согласно которой работа разрушения куска линейного размера D пропорционально $D^{2.5}$, что является «промежуточным» между пропорциональностью D^2 (гипотеза П. Риттингера) и пропорциональностью D^3 (гипотеза Ф. Кика). На самом деле П. Риттингер вывел

свою гипотезу на основе наблюдения процессов тонкого помола, а Ф. Кик рассматривал процессы разрушения кусковых материалов (по современным представлениям масштаб среднего дробления), что лишний раз подтверждает наличие принципиальных различий в процессах разрушения при различных условиях и масштабах [21].

Третий «закон» (Бонда) является чисто эмпирической зависимостью, выведенной из анализа результатов испытаний измельчением большого числа реальных объектов – руд. Сходимость закона с реальными процессами дробления-измельчения позволила разработать критерии оценки работы дробильных аппаратов. Известен индекс работы W_i Бонда, как удельный расход энергии в киловатт-часах на одну короткую тонну, необходимый для дробления от бесконечного массива до продукта крупностью 80 -100 мкм [22].

Дальнейшее развитие теории разрушения связано с именами А. Гриффитса (1893-1963 гг.) и А.Ф. Иоффе (1880-1960 гг.), которые предложили наиболее рациональное представление о процессе разрушения. Процесс разрушения твердых тел связывался с наличием в теле различных дефектов и трещин. Разрушение этих систем характеризуется, прежде всего, разнообразием для разных геометрических масштабов (микро и макроуровни), зависящих от структуры горной породы (рудных материалов), от сочетания групповых дислокаций и дефектов, а также от многостадийности динамики самого разрушения (подготовительная фаза, образование зародышевых трещин, микротрещин, макротрещин, рост магистральных трещин) [23].

Применительно к разрушению рудных материалов, представляющих собой сложную неоднородную анизотропную поликристаллическую систему, развитие теории разрушения твердых тел связано с представлением о дезинтеграции горных пород. Смысл дезинтеграции сводится к особенности разрушения горных пород, вследствие разрыва наиболее слабых связей между составляющими эту породу компонентами, в том числе связанной с раскрытием мономинеральных фаз. При этом, процесс дезинтеграции представляет собой сложный процесс, зависящий от

множества различных факторов, поэтому существует множество работ по исследованию процессов дезинтеграции рудных материалов. Были разработаны несколько моделей разрушения рудных материалов, одной из которых является кинетическая модель Ф. Бонда (1952 г.) о разрушении куска материала неправильной формы в процессе дезинтеграции в дробильно-измельчительных аппаратах. Согласно этой модели, в первую очередь, дробятся выступающие части кусков материала усилием, пропорциональным площади скола. В последующем, при дальнейшем наращивании усилия, материал поглощает энергию, подвергаясь деформации, величина которой зависит от структуры и формы куска конкретного материала. Превышение критических значений напряжения в различных точках материала приводит к образованию трещин и дезинтеграция куска является следствием последующего роста и слияния этих трещин.

В ходе своих экспериментов по ударному разрушению кварца в копре, Е. Пирет обнаружил, что при постоянных значениях энергии удара (при использовании металлического шара) первыми ударами разрушаются большинство частиц, но по мере продолжения эксперимента количество разрушаемых частиц уменьшается. Это приводит к потере большой энергии без образования новых поверхностей. Путем сравнения результатов с разрушением в квазистатических условиях (при медленном сжатии изолированных кристаллов кварца), он обнаружил, что в последнем случае образование новой поверхности на единицу энергии превышает первый вариант до 19 раз. Е. Пирет объяснил это явление особенностями образования критического напряжения. При малых концентрациях энергии воздействия (небольшое число ударов) критические напряжения достигаются только в нескольких точках, что приводит к протяженным разрывам с образованием небольшого числа частиц, но с большой площадью поверхности. А при интенсивных воздействиях плотность напряжения возрастает, но разрывы получаются небольшими с меньшей новообразованной поверхностью, состоящей из множества полученных частиц [24-26].

В разрушении горных пород большую роль играет его внутренняя структура, при этом существенное влияние оказывает масштабность, то есть переход с макроструктурных особенностей разрушения до микроструктурных. Макроструктурные особенности рудных материалов проявляются в наличии определенной анизотропии механических свойств, т.е. в наличии слабых пластовых, в том числе межзерновых связей, в которых уровень критического напряжения наступает при небольшой интенсивности воздействия. Микроструктурные особенности рудных материалов, прежде всего, связаны с повышенными прочностными свойствами отдельных зерен, в том числе кристаллитов (мономинералов) [27, 28], полученных в результате нарушения макроструктуры. Поэтому вполне объяснимо, что при разрушении мелких фракций тратится достаточно большое количество энергии [29]. В отличие от массового разрушения мелкого материала под динамическим воздействием, в квазистатических условиях разрушения львиная доля энергии тратится на трение частиц друг с другом.

Более рациональное определение влияния неоднородностей в процессе разрушения рудных материалов пытались дать Д. Уолкер и Р. Шоу в 1954 году. Согласно их концепции, удельная энергия измельчения тонкого слоя материала постоянна до тех пор, пока толщина этого слоя меньше размеров имеющихся неоднородностей. Начиная с известной критической толщины слоя вероятность встретить неоднородность возрастает, и удельная энергия измельчения резко падает. Они даже пытались экспериментально определить критическую толщину слоя неоднородностей. В частности, для мрамора критическую толщину определили в 0,8 мкм, гипса – 0,75 мкм и талька – 0,2 мкм. В соответствии с этим, процесс шарового измельчения можно представить следующим образом. Когда частица меньшего размера по сравнению с шарами зажимается двумя из них, то она разрушается усилием сдвига. Если она по размеру достаточно мала, чтобы не содержать никакой неоднородности, то срез произойдет по плоскостям, определенным геометрией поверхности шаров с преодолением фактической

прочности зерна. Если же частица содержит какую-нибудь неоднородность, то разрыв произойдет в плоскости, проходящей через эту неоднородность при значительно меньшем усилии, чем фактическая прочность зерна.

Фактические результаты дробления и измельчения значительно расходятся с моделью Бонда, которая предполагает, что основное количество энергии, необходимой для разрушения куска породы тратится на формирование первой трещины, данное расхождение во многом было разрешено работами различных ученых, которые доказали, что при разрушении очень большую роль играют пластические деформации.

Г.С. Ходаков, основываясь на работах Ю.Г. Коняшина, Л.И. Барона, Г.М. Веселова, изучавших пластические деформации различных горных пород на образцах диаметром 400 мм и высотой 40 мм при одноосном сжатии, предположил, что эти эксперименты демонстрируют, что даже хрупкие горные породы, такие как кварцит и джеспилит, обладают обширной областью пластической деформации. При максимальной пластической деформации этих пород тепловые потери составляют почти половину всей работы, необходимой для их разрушения, а для таких пластичных пород, как мрамор и известняк, более 80% [30].

С учетом потерь на деформацию П.А. Ребиндер вывел формулу:

$$\Xi = K_d D^3 + K_s D^2, \quad (1.1)$$

в соответствии с которой, элементарная работа, затрачиваемая в процессе разрушения куска материала, равна сумме работ на деформацию и на образование новой поверхности. K_d , K_s – соответствующие коэффициенты пропорциональности.

Формула впоследствии приобрела название объединяющего закона дробления Ребиндера. Преимущество формулы с учетом трех законов дробления заключается, прежде всего, в аддитивном ее построении. Подчеркивается очень важная роль пластической деформации, образования различных дефектов на

поверхности материала, потерь на внешнее трение. Формулу можно в широких пределах интерпретировать благодаря наличию двух независимых слагаемых.

И, наконец, серьезный вклад в области разрушения горных пород внес В.И. Ревнивцев. Он разработал и всесторонне обосновал концепцию селективной дезинтеграции руд и понятия геометрической и энергетической селективности дезинтеграции горных пород, что фактически означает разрушение по поверхностям раздела фаз при минимальных энергозатратах [31].

Им были разработаны основные принципы рациональной организации раскрытия минеральных сростков при подготовке рудного сырья к обогащению.

Наиболее важными из них являются:

- приложение к разрушаемому материалу многократных дозированных по величине нагрузок, причем в целях снижения ошламования, нагрузка выбирается по сопротивляемости более слабого компонента;

- применение различных методов разупрочнения руд, снижающих прочность контакта разноименных компонентов и облегчающих селективное раскрытие сростков.

В теоретическом плане В.И. Ревнивцев развил объединенный закон дробления-измельчения Ребиндера. Суть предложений сводится к следующему: при определении энергетических затрат на дробление-измельчение, оценку изменения гранулометрического состава вести согласно III закона дробления-измельчения Бонда; изменение сопротивляемости разрушению, а также общую сопротивляемость разрушению материала в зависимости от крупности исходного и готового продукта рассчитывать, учитывая наличие масштабного фактора крепости. В этом случае появляется возможность увязать закон Бонда с современными теориями прочности твердого тела, например, статической, кинетической, дислокационной и т.д. [32].

Действительно, характер разрушения очень сильно зависит от масштабности, который объясняется наличием критических размеров с различными

прочностными свойствами одного и того же материала, но разных микро и макроуровней.

Наиболее тонкой и дефектной является структура, обусловленная разрывом кристаллической решетки, при этом разрывы расположены друг от друга на расстоянии около 0,1 мк или 200 атомов среднего размера [33]. Эта структура представляет собой первый предел размола частиц, т.к. измельчение ниже этого размера приводит к разрушению бездефектной кристаллической решетки, что требует значительного увеличения затрат энергии. По этой причине, при расчетах расхода энергии, необходимой для образования единицы длины вновь возникающей трещины или единицы новой поверхности, ограничиваются крупностью продукта помола равной 0,1 мк.

Следующий предел измельчения обусловлен размером кристаллов в материале. Разрушение происходит легче вдоль границ кристаллов чем поперек них, и, поэтому, размер кристаллов определяет естественный размер зерна, который на графике зернового состава отображается как неправильные искривления кривой. Обычно этот предел соответствует тонкому измельчению, необходимому для освобождения рудных сростков, чтобы их можно было измельчить в процессе обогащения, особенно в том случае, когда содержание ценного компонента является большим. Здесь наблюдается недостаток частиц размером ниже естественного размера зерна. Такие кривые зернового состава приводят к неточному определению величины E_r . Естественный размер зерна определяется дефектными структурами, сконцентрированными в некоторых ограниченных пределах крупности. Любое понижение удельного веса мелющей среды, которое получается, например, при переходе от размола в шаровой мельнице к самоизмельчению, увеличивает значение естественной зернистости, благодаря уменьшению количества частиц, измельченных с нарушением естественного размера зерна.

Развитие теории процессов разрушения рудных материалов позволило в последнее время сформулировать наиболее общие условия и требования к

концепции селективности дезинтеграции, предполагающую прежде всего разрыв транскристаллитных, интеркристаллитных связей [34]:

- концентрация градиента напряжений в зоне поверхностей раздела фаз при кратковременном характере его действия, с сохранением целостности фазовых объемов при резком убывании напряжения;

- предварительное разупрочнение межфазных границ;

- оптимальность соотношений динамических параметров нагружения (величина, время, характер) со скоростью деформирования материала для снижения энергетических потерь;

- непрерывность процесса с постоянным и своевременным удалением готовой продукции из рабочей зоны.

1.2 Процессы разрушения рудных материалов «свободным ударом»

Среди наиболее перспективных способов, соответствующих принципам селективной дезинтеграции являются динамические и ударные способы разрушения горных пород.

Практически данный способ реализован для большинства дробильно-измельчительного оборудования ударного действия реализующих принцип «свободного удара». Термин «свободный удар» – введен Л.И. Бароном [1] или «разрушение горной породы свободным ударом» определяется как результат столкновения движущегося куска рудного материала с подвижным или неподвижным ударным отбойным элементом.

Известно, что при таком ударе кусок горной породы может испытывать динамические воздействия чрезвычайно большой энергии, что может спровоцировать соответственно и весьма большие напряжения в ударяемом теле.

При этом, в случае «свободного удара», особенность способа заключается в том, что кусок горной породы сам непосредственно участвует в процессе самого

разрушения, так как энергия удара прямо пропорционально массе самой частицы, согласно классической формуле определения кинетической энергии:

$$W_k = \frac{m|\bar{V}|^2}{2}; \quad (1.2)$$

где W_k - кинетическая энергия, Дж; m - масса дробимого куска, гр.;

$|\bar{V}|$ – абсолютная величина линейной скорости частицы относительно рабочего органа дробилки.

При мгновенном динамическом (ударном) приложении нагрузки, порода испытывает аккумуляцию огромного напряжения в ничтожно малом промежутке времени. В результате ударный импульс преобразовывается в деформационные процессы волнового характера, поэтому высвобождение аккумулярованной энергии сопровождается разрывом межкристаллических связей рудного тела. Причем разрушение материала происходит за счет передачи энергии динамического воздействия, в основном, во внутреннее растягивающее напряжение.

Отличительная особенность ударной нагрузки еще заключается в кратковременности ее действия. В принципе, короткий (однако не меньше необходимого для данных условий минимума длительности) период силового воздействия в сочетании с очень высокой интенсивностью благоприятен для диспергирования материала без переизмельчения. Свободный удар в этом отношении еще более рационален, чем удар по твердому телу, опирающемуся на какую-либо жесткую поверхность («отбойник»). Свободный удар, учитывая точечный характер приложения энергии удара, минимизирует все энергоемкие контактные процессы, такие как смятие и уплотнение породы в зоне контакта.

Согласно исследованиям Г. Д. Хлебникова, который изучал процессы разрушения горных пород при дроблении, до 95-97% всей энергии, затрачиваемой на разрушение образца горной породы, расходуется на формирование контактных зон между дробящими поверхностями [35]. При этом форма и размеры этих

контактных зон существенно влияют на энергоемкость и характер разрушения породных образцов.

При разрушении кусков горных пород при свободном ударе, по крайней мере, при первом акте столкновения частицы с рабочим органом, очевидно, что главным физико-техническим параметром, определяющим эффективность данного способа разрушения является длительность ударного импульса, или, как говорят, скорость столкновения. В реальных аппаратах дробления и измельчения увеличивая скорость вращения ротора дробилки, мы увеличиваем скорость столкновения частиц, т.е. энергию динамического воздействия на кусок горной породы в момент контакта ударом. Это позволяет дробить более крепкий материал, иметь высокую производительность дробильной установки, обеспечивать высокую степень измельчения дробимого материала.

Однако, для разрушения кусков, в особенности крупных кусков обладающих большой массой не требуются высокие скорости удара. С повышением скорости ударного нагружения (столкновения) разрушение горной породы становится все более локализованным [36].

Действительно, при повышенных скоростях существенная доля энергии направляется на переизмельчение материала в контактной зоне, и время ударного воздействия настолько мала, что образующие микротрещины в теле горной породы не успевают соединиться между собой внутри всего объема куска. С другой стороны, с точки зрения энергии воздействия небольшая скорость удара компенсируется наличием относительно большей массы куска. Как правило, для крупного дробления рекомендуется приблизительная скорость удара – 15...20 м/с, среднего – 20...35 м/с, мелкого – более 35 м/с. Для измельчения более мелких классов крупности, чтобы сохранить рабочий уровень кинетической энергии при уменьшающейся массе дробимых кусков, необходимо увеличение скорости разрушаемых кусков исходя из классической формулы расчета.

При этом необходимо учитывать, что на эффективность разрушения мелких классов крупности большую роль будет играть направление вектора скорости

частицы на момент столкновения относительно нормали поверхности отражения. Проведенные исследования показывают, что отклонение вектора от прямого угла при встрече с рабочей поверхностью хотя бы на 15° снижает степень разрушения в 2 раза и более. Поэтому при разработке и проектировании дробильно-измельчительного оборудования с ударным принципом работы большое внимание уделяется необходимости обеспечения наибольшей вероятности нормального столкновения рабочих органов с разрушаемыми частицами или встречного столкновения частиц друг с другом. В работе [37], например, приведены кинематические и силовые расчеты ударно-отражательных дробилок, согласно которым для обеспечения прямого удара частицы об отбойную плиту требуется рассчитать угол наклона, учитывающий радиальное расстояние от центра вращения ротора до точки ударного соприкосновения с плитой, расстояния сброса материала с наружной точки ротора, скорости вращения ротора, скорости схода частицы с ротора и т.д.

Следует добавить, что для некоторых реальных аппаратов, реализующих способ свободного удара, изменение скорости вращения ротора с билами (масса которых постоянна) является практически единственным способом регулирования энергии удара, при обеспечении условий нормальности момента столкновения кусков горной породы с отражающими рабочими органами.

В измельчительных аппаратах, где требуются большие скорости свободного удара для разрушения мелких частиц, ограничение рабочей скорости частиц в аппаратах, связано только с проблемой технической исполнимости: с ростом скорости существенно повышается интенсивность изнашивания рабочего органа и металлических плит, затрудняется уравнивание машины, усложняется конструкция опор и т. п.

1.3 Новый способ дезинтеграции рудных материалов при ударном воздействии

С точки зрения эффективности массового ударного разрушения кусковых горных пород, кроме обеспечения условий единичного акта столкновения требуется учитывать и интенсивность (частоту) таких динамических контактов.

В лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН, д.т.н. А.И. Матвеевым разработан способ многократного динамического воздействия при дроблении и измельчении кусковых горных пород [38], который предполагает возможность организации интенсивных ударных воздействий в рабочей зоне аппарата дробления и измельчения [39-42].

Способ дезинтеграции не противоречит известному положению В.И. Ревнивцева, согласно которому для эффективного разрушения материала необходимо приложение многократных дозированных по величине нагрузок и применение различных методов разупрочнения руд, снижающих прочность контакта разноименных компонентов и облегчающих селективное раскрытие сростков.

Для процессов измельчения (традиционно измельчением считается разрушение частиц размером менее 5 мм) новый способ предполагает наращивание дозированных динамических нагрузок (скорости столкновения) на частицы горных пород непосредственно в процессе дезинтеграции, так как в процессе разрушения таких мелких фракций свободным ударом потеря массы существенно влияет на энергию воздействия. Причем интенсивность и уровень обеспечения необходимой скорости столкновения и ударных нагрузок может быть определен как расчетным, так и экспериментальным путем, в зависимости от крепости и исходной крупности частиц.

В новом способе создаются рациональные условия для разрушения частиц прежде всего за счет:

- создания условий интенсивного объемного образования микротрещин в частице горной породы приводящих к ее фатальному разрушению, а не к

частичному, которое чаще наблюдается в аппаратах дозированного одноактного действия, т.е. происходит совмещение процессов подготовительного и фатального разрушения частиц;

- постоянного обнажения поверхности в процессе разрушения, снижающее уровень потерь энергии на деформационные процессы и негативного влияния прослойки, перетертого ошламованного материала, образующегося в зоне динамических нагрузок.

Таким образом, новый способ в развитии положения В.И. Ревнивцева позволяет усовершенствовать метод разрушения рудных материалов «свободным ударом».

Реализация нового способа разрушения требует соответствующей проработки конструкции аппаратов дробления и измельчения, где принципиально важными условиями являются:

- организация многоактных динамических ударных контактов частиц с поверхностью рабочих органов аппаратов, в том числе контактов частиц друг с другом (элемент самоизмельчения);

- создание условий циркулирования не доизмельченных частиц в рабочей зоне аппарата;

- возможность своевременного удаления измельченной готовой фракции, в том числе удаления ошламованных фракций.

С учетом этих условий в лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН разработана дробилка многократного ударного действия ДКД-300 [43].

Принципиальная схема конструкции дробилки представлена на рисунке 1.1. Дробилка состоит из корпуса 1, имеющего делитель исходного материала 2, располагаемого ниже загрузочного патрубка 3, двух симметрично расположенных питающих лотков 4, пары роторов первичного 5, основного 6 и дополнительного 7, роторов вторичного дробления, центры которых расположены симметрично на линии окружности, образованной одним радиусом из центра корпуса, подъемно-спусковым механизмом дополнительных роторов.

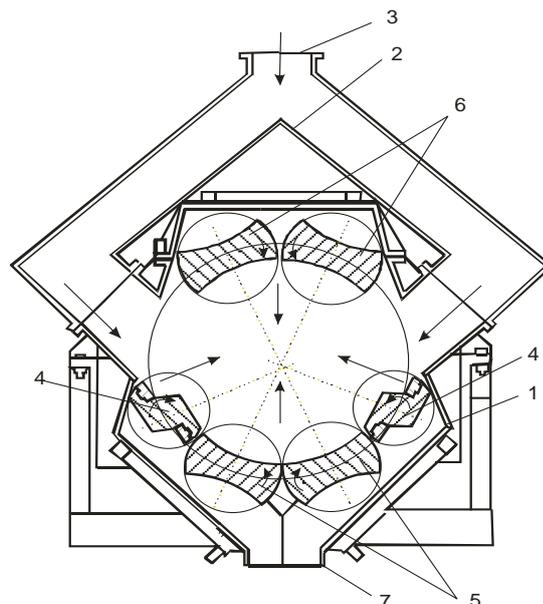


Рисунок 1.1 – Конструкция дробилки ДКД-300

Дробилка функционирует следующим образом: рудный материал равномерно поступает в загрузочный патрубок, где делитель распределяет его на два равнозначных потока. Затем материал подается через питающие лотки на ротор первичного дробления, где при получении удара куски рудного материала получают импульс. Под воздействием этого импульса разрушаемые куски сталкиваются под определенным углом в центре дробилки.

Далее раздробленные куски породы направляются по направлению импульса к ударной поверхности встречно вращающихся роторов вторичного дробления, где происходит дезинтеграция рудного материала. После этого раздробленные куски переносятся к дополнительным роторам вторичного дробления, работающим синхронно с основными роторами вторичного дробления. Это синхронное вращение роторов обеспечивает столкновение частиц в центре корпуса дробилки, что формирует зону активного ударного столкновения.

Конечные куски продуктов дробления, чьи размеры меньше зазора между билами вращающихся роторов первичного дробления и дополнительных роторов, попадают вниз между роторами и разгружаются через разгрузочный патрубок.

Предложенная дробилка [44-46] обеспечивает возможность регулировать крупность помола путем изменения зазора между билами роторов первичного дробления и дополнительных нижних роторов. Этот зазор регулируется с помощью подъемно-спускового приспособления дополнительных роторов. Кроме того, степень дробления может быть изменена путем установки роторов с разным размахом ударных бил. Крупные частицы оказавшись на поверхности дополнительных роторов, постепенно размельчаются до требуемой крупности помола. Вращение всех пар роторов синхронизировано, роторы первичного дробления и роторы вторичного дробления отрегулированы по фазе и числу оборотов, а основные и дополнительные роторы вторичного дробления также согласованы по фазе вращения.

Благодаря такой конструкции в зоне активного ударного столкновения происходит чередование процессов саморазрушения исходных горных пород, отброшенных от роторов первичного дробления, и частиц, отброшенных от роторов вторичного дробления, обладающих схожим импульсом. Это позволяет добиться более эффективного разрушения горных пород и упрощает эксплуатацию дробилки. Кроме того, дробилка позволяет увеличить степень дробления и получить более однородный по крупности помол готового продукта, что приводит к повышению эффективности дробления [43, 47, 48].

Техническая характеристика дробилки ДКД-300 представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Техническая характеристика дробилки ДКД-300

1. Производительность	6-15 т/ч
2. Установленная мощность	15 кВт
3 Количество оборотов в мин (эл. двигателей)	1500
4.Исходная крупность дробимого материала	до 150 мм
5. Крупность дробленного материала	- 2 мм
6. Степень дробления	50-60
7. Диаметр роторов	300 мм
8. Габариты	2200x1500x1900 мм
9. Масса	1500 кг

1.4 Существующие аппараты дробления и измельчения с ударным принципом работы

1.4.1 Дробилки ударного действия

В США в середине прошлого столетия (1842 год) была создана дробилка, работающая на основе принципа удара. Эта дробилка состояла из ротора с прикрепленными к нему металлическими билами, размещенного в корпусе из твердого дерева. Механизм заключался в захвате загружаемого материала билами, его разрушении, а затем отбрасывании осколков на отбойные плиты. Почти 100 лет спустя (в 1939 году), фирма "Нью Голланд Компани" из Маунтвилле, штат Пенсильвания, разработала и построила двухроторную мельницу с отбойными стержнями.

В Германии развитие мельниц и дробилок с отбойными плитами началось в 1942 г. независимо от Америки, ибо в связи с войной здесь не было известно об успехах, достигнутых в другом полушарии. В этом году Арно Андреас сконструировал первые ударные мельницы и мельницы-сушилки, работавшие на принципе отражения, для известковых заводов Рюдерсдорфа. Непосредственно после окончания войны развитие ударных механизмов, прерванное войной, было сначала возобновлено Арно Андреасом, а позже фирмой «Хацемаг» в Мюкстере. В последующие годы в изготовлении дробилок и мельниц, работающих на принципе отражения, приняли участие и другие фирмы.

Начав с небольших ударных мельниц, конструкторы переходят все более к крупным агрегатам, которые могли бы соответствовать требованиям в отношении большой производительности и высокой степени измельчения.

Подробное описание основных установок ударного и ударно-отражательного действия представлено в работах различных авторов [49-51].

В конструкции и работе ударных дробилок и ударных мельниц нет принципиального различия.

Ударные дробилки и мельницы состоят из сварного стального корпуса, где вращается обычно один ударный ротор, на котором жестко закреплено от 2 до 8 бил. В корпусе ротор охватывается отбойными плитами. В Америке вместо обычно используемых отбойных плит сначала применяли отбойные стержни. Как правило, нижняя часть корпуса ударных мельниц и дробилок является открытым, но могут иметь выпускающее отверстие с решетками.

В процессе работы ударных аппаратов куски породы сначала разрушаются ударными брусьями ротора. Затем брусья отбрасывают раздробленный материал на отбойные плиты. Измельчающее действие ударных брусьев зависит от их окружной скорости, а энергия столкновения с отбойными плитами от массы частицы, подвергнутой ускорению, и от ее скорости ($E_{кин} = m/2 \cdot v^2$) [52].

Производительность аппаратов зависит от следующих факторов:

- 1) от окружной скорости ударных брусьев (10–70 м/с, что соответствует скорости вращения ротора 250–1200 об/мин);
- 2) от числа ударных брусьев (2–8);
- 3) от ширины щели между ударными брусьями и отбойными плитами (размер щели можно регулировать);
- 4) от количества загружаемого материала и от его структуры.

Классической ударной дробилкой является дробилка фирмы «Хацемаг» (Мюнстер) (рисунок 1.2). Дробилки выпускают с патентованными отбойными плитами, подвешенными маятникообразно. Благодаря своей податливости, они обеспечивают надежную защиту дробилки от поломки при попадании недробимых инородных тел. Как показал опыт эксплуатации передний нижний край отбойной плиты должен по возможности находиться на перпендикуляре, проходящем через середину ротора, а зазор между ними задает максимальную крупность загружаемого материала.

Ротор состоит из дисков, покрытых трубным кожухом, который снабжен приваренным держателем ударных брусьев.

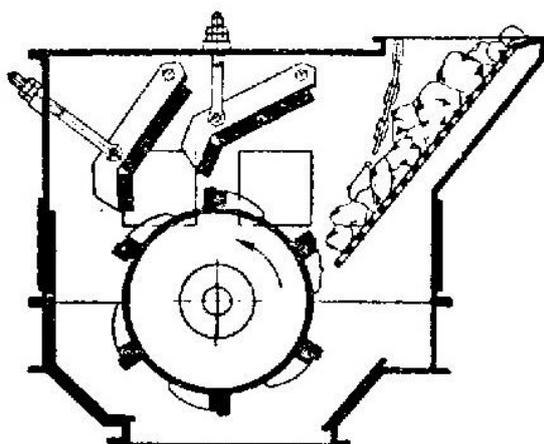


Рисунок 1.2 – Конструкция ударной установки фирмы «Хацемаг»

Чтобы при влажном материале избежать залипания, на задней стенке дробилки помещают цепную завесу, снабженную тяжелыми стальными пластинами.

В настоящее время большое распространение получили ударные дробилки компании «Barmac» с вертикальным валом, реализующие принцип разрушения «кусок о кусок». Эти аппараты решают задачу защиты вращающегося барабана (ускорителя) от абразивного износа. Для обеспечения защиты ускорителя и отбойной плиты применяется сыпучий материал, который, образует слой самофутеровки. Хотя такая идея не является новой, концепция ускорителя, предложенная компанией "Barmac" для центробежно-ударных машин, остается наиболее эффективной. Этот принцип самофутеровки, применяемый для защиты ускорителя и отражательной поверхности машины, предполагает закрытую конструкцию ускорителя. Сегодня многие производители центробежных дробилок используют это решение.

Формирование самофутеровки осуществляется согласно представленному способу (рисунок 1.3).

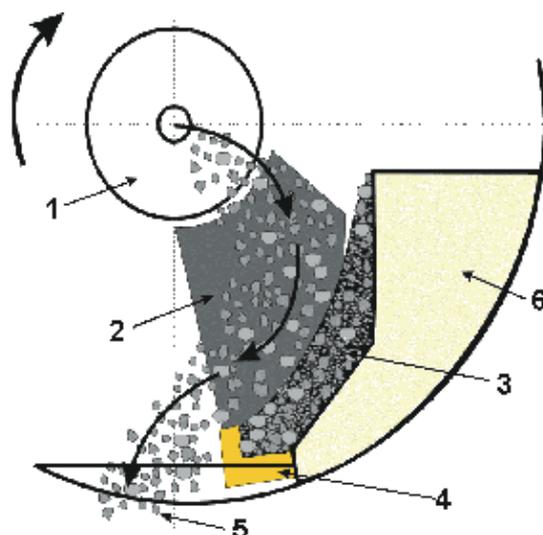


Рисунок 1.3 – Схема образования самофутеровки в ускорителе:

1 – рассекатель; 2 – подкладной лист; 3 – карман самофутеровки; 4 – твёрдосплавная лопатка; 5 – сход материала с ускорителя; 6 – корпус ускорителя

В процессе работы часть горной массы разрушается, образуя сплошной сцементированный слой самофутеровки.

Конструкция, реализованная в дробилках "Вагмас", является классической для современных центробежно-ударных моделей. На периферии камеры дробления располагается горизонтальная кольцевая площадка, на которой горная масса образует коническую поверхность с естественным углом откоса (рисунок 1.4).

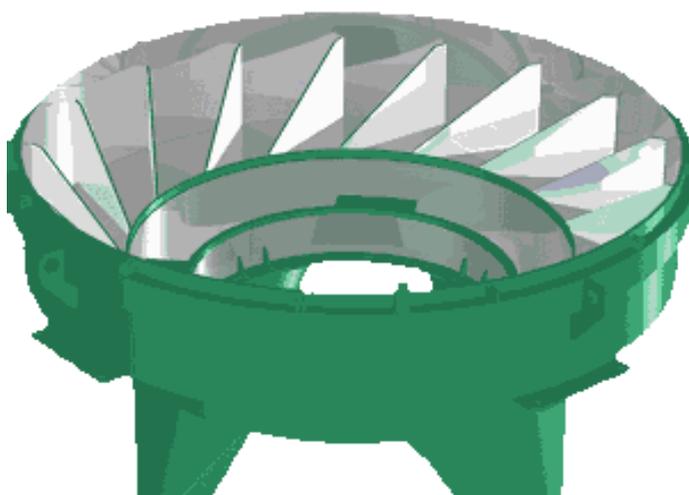


Рисунок 1.4 – Пример расположения косынок в камере дробления

При ударе кусков горной массы об эту коническую отражательную

поверхность, большая часть осколков отражается вверх. Затем, под действием силы тяжести, они снова сталкиваются с потоком из ускорителя. Однако эффективность использования кинетической энергии кусков горной массы в режиме "кусок о кусок" немного ниже, чем в режиме "кусок о металл". Это происходит из-за ударов потока камней, вылетающих из ускорителя, по касательной к кольцевой отбойной поверхности самофутеровки, что приводит к увеличению угла соударения при увеличении зазора между ускорителем и отбойной поверхностью [53].

1.4.2 Мельницы ударного действия

Конструкция мельниц ударного действия обычно предусматривает измельчение относительно крупных частиц преимущественно с использованием мелющих рабочих органов, а при сверхтонком измельчении на передний план выступает измельчение за счет взаимного соударения частиц (самоизмельчение). При этом для увеличения скорости частиц используются потоки воздуха, которые образуются в процессе вращения рабочих органов, так же образующиеся потоки воздуха частично используются для отвода измельчённого продукта. Концентрация смеси размалываемого материала и воздуха должна подбираться такой, чтобы вычисленная средняя длина свободного пробега частицы [54] была бы меньше, чем возможная траектория беспрепятственного движения.

Примером такой мельницы служит сепарационная ударная мельница «Дуплекс» с внутренним циклом размола, впервые была показана на выставке АСНEMA в 1961 г. [55]. Эта машина представляет собой мощную бесситовую молотковую мельницу для размола материалов средней твердости, а иногда и твердых (рисунок 1.5).

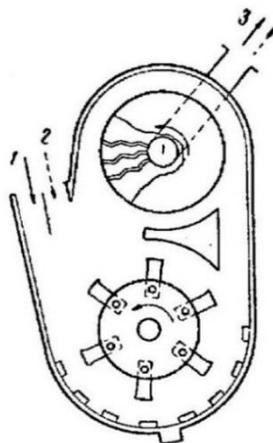


Рисунок 1.5 - Сепарационная ударная мельница «Дуплекс»:

1 - подача исходного материала; 2 - воздух; 3 - выход продукта

Материал с регулируемого питающего устройства (например, вибрационного желоба) падает в бронированное рабочее пространство с отбойными брусками и уловителем для недробимых тел, где подвергается измельчению горизонтальным ротором с билами диаметром 400 мм, шириной 400 мм и окружной скоростью 85-125 м/сек. В верхней части корпуса мельницы находится новый зигзагообразный воздушный сепаратор «Мультиплекс».

Граница разделения этого сепаратора благодаря бесступенчатому изменению скорости вращения от 400 до 4350 об/мин может варьироваться в диапазоне 20-150 мк и крупнее в соответствии с видом материала при резкой верхней границе крупности. Крупные частицы отбрасываются непосредственно в зону размола.

Защитный бронированный отражатель предохраняет колесо вентилятора от прямых попаданий материала. Мелкозернистый материал через середину рабочего колеса вентилятора отсасывается в трубопровод. Мощность привода ротора составляет 20-33 кВт, мощность привода сепаратора – 3 кВт. В среднем пропускается 13 м³/мин воздуха, что соответствует 0,6 м³/мин воздуха на каждый киловатт установленной мощности привода. Воздух поступает в рабочее пространство выше глушителя шума рядом с загрузочным отверстием.

Примером конструкции мельницы для тонкого и сверхтонкого размола является мельница «Ультра-ротатор» [56] (фирма «Альтенбургер Maschinen К. Г.

Гамм») с вертикальной осью и воздушным сепаратором (рисунок 1.6). Сфера применения этой мельницы могла бы постоянно расширяться, если бы удалось найти для различных материалов правильное соотношение смеси и материала, а также надлежащую степень разделения воздушного потока на транспортирующий и рабочий.

Материал с крупностью частиц в пределах 2-3 мм подается в зону размола через питающее устройство, такое как шнек, расположенный под мельницей. Затем он пропускается через эту зону с помощью потока воздуха, создаваемого нижним вентиляторным колесом.

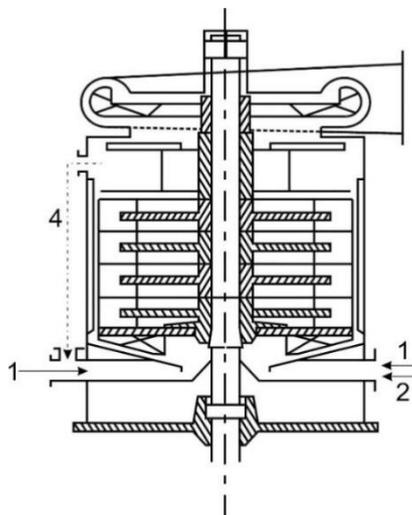


Рисунок 1.6 - Мельница «Ультра-ротор», тип III:

- 1 - воздух; 2 - подача исходного материала; 3 - выход продукта;
4 - обратный канал

Зона размола охватывает пространство между рифленой стенкой статора и двумя или четырьмя роторными дисками с билами, которые формируют камеру измельчения. Выше этой зоны размола на роторе расположен кольцевой сепаратор. Крупнозернистый материал повторно подается через обвод наружу мельницы и направляется во входное отверстие. Тонко измельченный продукт от мельницы поступает к головке мельницы, которая может регулироваться дросселированием воздуха в четырех воздушных щелях. Это позволяет воздействовать на движение материала над дроссельной заслонкой в обратный канал. Промежуток между

ротором и статором устанавливается в диапазоне от 2 до 15 мм.

Активное использование потока воздуха в измельчении используется в установке «Турбоселектор» (фирма «Бауермайстер», Гамбург) и предназначается для сверхтонкого размола незначительного количества материала (рисунок 1.7), измельчительная установка в качестве основного элемента содержит турбоселектор, к которому присоединены два циклонных сепаратора и один пластинчатый тканевый фильтр вместе с вентилятором. В такой установке можно получить три фракции.

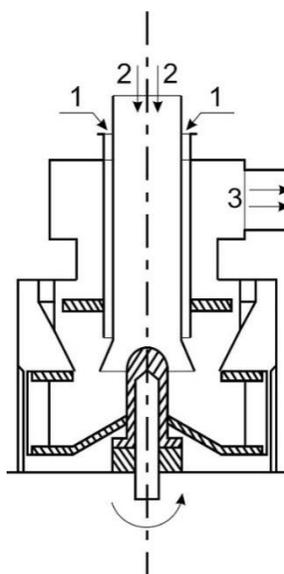


Рисунок 1.7 – Мельница «Турбоселектор» UTSA:

1 - воздух; 2 - подача исходного материала; 3 - выход продукта

Мельница, имеет вертикальный вал и в качестве мелющего органа турборотор, известный по большим турбомельницам Бауермайстера. Билы проходят на небольшом расстоянии от дробящей плиты, по всей окружности которой проделаны полукруглые желоба для создания завихрения воздуха. Материал поступает с воздухом в центр ротора и после прохождения зоны размола попадает в неподвижный корпус селектора. Выше воронки селектора он поступает через тангенциальные прорези непосредственно в зону разделения. Крупнозернистый материал в спиральном потоке выделяется из смеси воздуха и материала, а тонкий продукт захватывается воздухом и увлекается через кольцевую

бленду вверх в отсасывающую камеру. Крупнозернистые частицы отводятся из зоны разделения через прорезь вниз. Они попадают в поток вторичного воздуха и снова оказываются в зоне размола. Вторичный воздух всасывается между подводящей трубой и внешним регулировочным трубопроводом, при этом из крупнозернистого материала выделяется захваченный тонкий продукт. Рабочее пространство мельницы имеет диаметр 220 мм, окружная скорость ротора равна приблизительно 120 м/сек. Мощность привода всей установки «Турбоселектор» составляет 9,5 кВт, на холостом ходу установка потребляет 4 кВт. Через мельницу в минуту проходит около 10 м³ воздуха, т.е. 0,6 м³/мин на каждый киловатт установочной мощности привода и поэтому размалываемый материал не подвергается особо сильному нагреванию. Тонину помола регулируют изменением количества материала при помощи вибрационного желоба с регулятором, передвижением границы разделения (в крышу корпуса селектора вкладывают кольцевые диафрагмы различного диаметра) или изменением пропуска воздуха при помощи дроссельного регулирования вентилятора.

1.4.3 Преимущества и недостатки ударных установок

Применение дробилок и измельчителей с ударным принципом работы нужно рассматривать с технической и экономической точек зрения. Если при техническом сравнении, главным образом, учитывают производительность и степень измельчения, то при экономическом на передний план выступают также вопросы надежности в работе и простота конструкции. Требование надежности в работе в горном деле стоит на первом месте. При этом очень важное значение имеет исходный материал и его структурно-механические свойства.

При подходящих условиях структурно-механические свойства исходного материала дают возможность применения ударного измельчения, которое обладает рядом преимуществ:

- 1) высокая степень измельчения, которая часто ликвидирует среднюю

стадию дробления (измельчение частиц средней величины);

2) незначительная потребность в помещении и значительно более высокая производительность по сравнению с конусными дробилками;

3) спокойный ход динамически сбалансированного ротора, что позволяет обходиться без фундаментов тяжелого типа;

4) закрытая конструкция, которая обеспечивает возможность легкого присоединения к вытяжному обеспыливающему устройству;

5) быстрый ремонт, который обеспечивается легкой доступностью в машину и незначительным весом заменяемых частей, наиболее подверженных износу (ударные брусья и отбойные плиты);

б) хорошая защита от инородных недробимых тел, следует все же упомянуть, что в последнее время благодаря применению гидравлики и предохранительных фрикционных муфт достигнута надежная защита от инородных тел и у других измельчающих механизмов.

Недостатками ударных дробильно-измельчительных аппаратов являются необходимость регулярной подачи материала питателями и вибрационными желобами для обеспечения оптимального режима работы установок и износ, требующий частой замены рабочих органов.

Исследования на рентабельность различных дробильно-измельчительных машин, работающих при сравнимых условиях производства, до сего времени выполнены только в немногих случаях и, вероятно, их не следует ожидать и в будущем, так как опыты большого масштаба, рассчитанные на длительную работу машин, едва ли возможны из-за больших расходов, а в практике мы очень редко встречаемся со сравнимыми условиями опыта.

Известны результаты сравнительных исследований нескольких установок по дезинтеграции горной породы, работающих при одинаковых производственных условиях на соседних Рейнских шахтах. При этом было установлено, что стоимость ударной дробилки составляет приблизительно 36%, а расход на износ — 53% аналогичных затрат по конусной дробилке. Исследования установок по дроблению

горной породы с различными типами дробилок, проведенные по поручению Объединения каменноугольных шахт, показали, что расходы на износ и величина износа в зависимости от эффекта измельчения у щековых и ударных дробилок приблизительно одинаковы [57].

Следует отметить, что, разработка и применение ударных дробилок и мельниц явилось значительным техническим прогрессом и привело к созданию новых конструкций аппаратов дробления и измельчения, находящих многообразное и успешное применение для ряда промышленных проектов.

Роль и место аппаратов ударного действия можно охарактеризовать сводными данными, приведёнными в таблице 1.2, где представлены данные по применению дробильно-измельчительных машин к рудным материалам с разными структурно-механическими свойствами.

Таблица 1.2 – Применение дробильно-измельчающих машин

По структурно-механическим свойствам (твёрдость, хрупкость, раскалываемость, вязкость, рыхлость)	По наиболее крупной частице загружаемого материала			
	Крупное дробление от 1500 до 100 мм	Мелкое дробление от 100 до 10 мм	Измельчение от 10 до 5 мм	Тонкое измельчение от 1 до 0,5 мм
Измельчение твёрдых материалов (твёрдых пород, руд)	Щековые дробилки Конусные дробилки Ударные дробилки	Молотковые др. Конусные др. мелкого дробления Ударные дробилки	Стержневые и шаровые дробилки	Вибрационные мельницы
Измельчение материалов средней твёрдости (углей, солей, камней и глин)	Валковые дробилки Молотковые дробилки Ударные дробилки	Валковые дроб. Молотковые др. Ударные дробилки	Стержневые и шаровые дробилки Ударные мельницы Кольцевые мельницы	То же

Развитие ударных мельниц является одним из приоритетных направлений современности, появляются очень много новых разных оригинальных вариантов

дробилок и измельчителей, идет и будет продолжаться постоянный поиск новых путей для решения актуальнейшей задачи совершенствования способов измельчения и аппаратов, реализующих их.

ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих конструкций ударного дробильно-измельчительного оборудования показал, что ударные аппараты заслуживают особого интереса из-за высокой эффективности работы и относительно небольших габаритов, а также низких энергозатрат.

2. Также выявлен ряд основных недостатков рассмотренных конструкций дробильно-измельчительных аппаратов, которые выдвигают принципиальные требования по разработке новых типов машин. Во-первых, разработать такие мельницы, которые создавали бы такой характер разрушения, который будет способствовать максимальному селективному раскрытию минералов полезных компонентов, во-вторых, компактность и максимальное снижение энергозатрат и металлоемкости.

3. Для наиболее эффективного измельчения рудного материала и обеспечения полноты раскрытия полезных компонентов, необходимо обеспечить повышение интенсивности и количества динамических воздействий на разрушаемый рудный материал.

4. На процессы разрушения в центробежных измельчительных установках большое влияние оказывают конструктивные особенности, такие как форма рабочих органов. От формы рабочих органов, образующих рабочую камеру, среду для разрушаемого материала, зависят условия образования интенсивности динамических нагрузок, направленность динамических воздействий, способствующих накоплению критического напряжения и разрушению частиц.

2 Разработка и сравнительные исследования центробежных мельниц многократного ударного действия с разной конструкцией рабочих органов

2.1 Принципиальные конструкции центробежных мельниц многократного ударного действия

Одним из приоритетных направлений исследований является разработка малогабаритных и высокоэффективных измельчителей, наибольшее распространение среди которых получили центробежные мельницы ударного действия. Это связано с тем, что они менее энергозатратны, просты по конструкции и имеют небольшие габаритные размеры при относительно высокой производительности.

Большинство существующих ударных мельниц для измельчения рудных материалов в своих конструктивных решениях не учитывают многообразие физико-механических свойств измельчаемого сырья и реализуют ограниченные одно-двухактные механические воздействия динамического характера, недостаточные для эффективного разрушения рудного материала [58-61]. Повышение эффективности измельчения невозможно без новых конструктивных решений в центробежных измельчителях, направленных на создание рациональных условий ударного разрушения материала в рабочей зоне измельчения аппарата.

В лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН на основе ранних теоретических и экспериментальных исследований разработан и защищен патентами РФ новый ряд мельниц [62, 63] многократного ударного действия (патенты РФ: №2150323, патент РФ №2193447), которые были развиты автором в части подачи и получения патентов (прил. 1-7) на изобретение РФ (№ 2209668, №2198028, № 2416463, № 2746502, №2365411, №2281809, № 2456100) и патента (прил.8) на полезную модель РФ (№ 94168).

Принципиальные конструкции разработанных мельниц показаны на рисунке 2.1, изобретения защищены патентами РФ [64-66]. В основном мельницы конструктивно отличаются по форме рабочих органов, соответственно которым названы (ступенчатая, конусная и дисковая мельница).

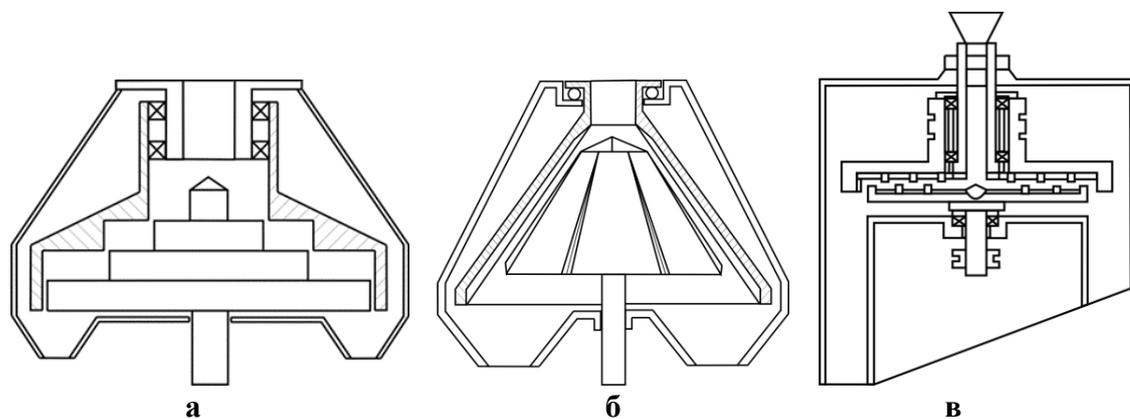


Рисунок 2.1 – Общий вид центробежных мельниц:

а) со ступенчатыми; б) с конусными; в) с дисковыми рабочими органами

Разработанные центробежные мельницы имеют особенность, которая заключается в возможности применения многократных динамических воздействий в процессе перемещения частиц в рабочей зоне дезинтеграции [67-70]. Это достигается благодаря увеличению скорости взаимодействия частиц с поверхностью рабочих органов по мере радиального перемещения материала в зоне измельчения от загрузки к разгрузке. При этом обеспечивается эффективное разрушение измельчаемых материалов по мере последовательного уменьшения их размера (потери массы) [71,72].

2.1.1 Конструктивные особенности центробежной мельницы со ступенчатыми рабочими органами

В лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН была разработана центробежная ступенчатая мельница ударно-отражательного действия, в которой реализован принцип обеспечения многократности ударного столкновения разрушаемых

частиц, как с поверхностью рабочих органов, так и между собой в условиях наращивания энергии динамического воздействия по ходу перемещения разрушаемого материала в рабочей зоне измельчения [62].

Центробежная ступенчатая мельница ударно-отражательного действия состоит (рисунок 2.2) из герметичного цилиндрического разборного корпуса 1, верхняя загрузочная часть которого выполнена в виде утопленной втулки 2 по оси, с бункером 3, с фиксированным электродвигателем 4 на верхней поверхности так, чтобы привод 5 находился внутри корпуса. Внутренняя поверхность верхнего ротора выполнена ступенчатой формы, на вертикальной окружной стенке каждой ступени под углом расположены отбойные элементы 8. Верхний рабочий орган вращается от привода верхнего электродвигателя.

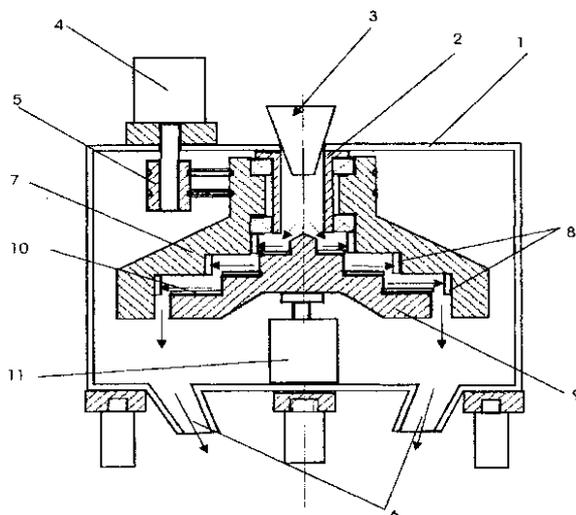


Рисунок 2.2 – Конструкция центробежной ступенчатой мельницы

Нижний рабочий орган 9 представляет собой ступенчатый конус с разгонными ребрышками 10 на каждой ступени и вращается противоположно по отношению к верхнему рабочему органу от двигателя, установленного по оси на нижней части корпуса. Верхний и нижний рабочие органы установлены соосно таким образом, что уровни кромок ступеней в них примерно совпадают и за счет разности наружного диаметра ступени нижнего ротора и внутреннего диаметра ступени верхнего ротора образуют рабочую камеру.

В процессе работы исходная дезинтегрируемая порода загружается в приемный бункер 3 и поступает в мельницу через загрузочную втулку корпуса 2 на верхнюю ступень вращающегося нижнего рабочего органа 9, где куски породы при помощи радиально установленных разгонных ребрышек 10, приобретают максимальную радиальную скорость в крайней точке ступени, и, выбрасываясь от нее, испытывают жесткие нормальные удары об вставные отбойные плиты 8, закрепленных на внутренней стенке ступени противоположно вращающегося верхнего рабочего органа 7.

Нераздробленные куски породы отскакивают и снова получают удары об ребра разгонного диска и возвращаются до тех пор, пока не раздробятся, а раздробленные частицы за счет потери импульса выпадают на вторую ступень разгонного диска, от которого отражаются и встречают удар об отбойные плиты соответствующей ступени верхнего рабочего органа.

Процесс продолжается пока не разгрузится дезинтегрированная порода под воздействием центробежных сил с последней ступени нижнего рабочего органа и не удалится через разгрузочные отверстия на днище корпуса. Корпус герметизируется для предотвращения выброса пыли наружу.

Верхний рабочий орган имеет отбойные элементы, закрепленные под определенным углом на внутренних вертикальных стенках каждой ступени, обеспечивающие нормальные встречные удары кусков породы, вылетающих от разгонного ступенчатого диска (нижнего рабочего органа). Эффект разрушения при этом достигается сложением противонаправленных импульсов, сообщаемых горной породе верхними и нижними дисками измельчителя в момент удара.

Измельчитель также обеспечивает своевременный переход дезинтегрированной части породы, из-за потери инерции, на нижележащую ступень, где производится следующий цикл динамического воздействия. Нераздробленные куски породы, за счет сообщаемых противонаправленных импульсов со стороны рабочих органов находятся на этой ступени, многократно подвергаясь ударам рабочими органами мельницы до тех пор, пока не раздробятся

до степени, позволяющей переход на нижележащую ступень. А переход по ступеням позволяет одновременно наращивать энергию динамического воздействия, чем достигается эффективность измельчения в целом.

2.1.2 Конструктивные особенности центробежной дисковой мельницы

Одним из вариантов конструкций центробежных мельниц многократного ударного действия [62] является дисковая центробежная мельница [73, 74]. Принципиальная схема конструкции дисковой мельницы представлена на рисунке 2.3.

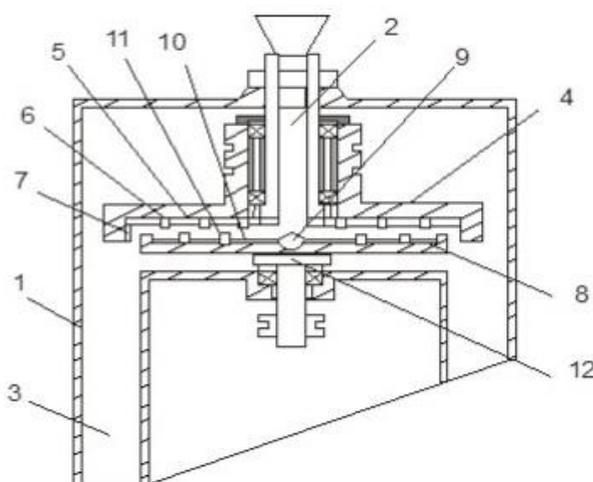


Рисунок 2.3 – Конструкция центробежной дисковой мельницы

Данная установка отличается от ступенчатой мельницы (ЦМВУ) упрощенной конструкцией рабочих органов. Вместо ступенчатых элементов здесь используются вращающиеся диски на рабочей поверхности. Эти диски имеют закрепленные на них радиальные отбойные и кольцевые отражательные элементы определенного порядка, которые находятся в противоположном вращении друг относительно друга и относительно элементов другого рабочего органа.

Процесс измельчения происходит следующим образом: начальный материал поступает в мельницу через загрузочную втулку 2 корпуса 1 и попадает на

углубление вращающегося нижнего рабочего органа 8. Здесь куски материала приобретают первоначальную скорость за счет радиально установленных разгонных пластинок 9 и выбрасываются вверх, где испытывают удары от радиальных отбойных элементов 5 верхнего диска 4. Часть материала отбрасывается вниз, а часть, благодаря избыточной скорости, проскальзывает вдоль отражательных кольцевых элементов 6 и также сбрасывается вниз.

Частицы, которые остаются на поверхности нижнего рабочего органа, ударяются о разгонно-отбойные элементы 10 и часть из них выбрасывается вверх, а часть перемещается радиально вдоль разгонно-отбойных элементов, набирая при этом линейную и радиальную скорости. Затем эти частицы достигают кольцевых отражательных элементов 11, откуда снова выбрасываются вверх и проходят цикл ударного столкновения.

Таким образом, благодаря постоянному наращиванию энергии удара и многократному ударному столкновению частиц, происходит эффективное измельчение материала. Размельченный материал, лишенный массы и инерции, выносится из мельницы через разгрузку 3 центробежной силой и воздушным потоком, создаваемым при вращении рабочих органов. При выходе из рабочей зоны все частицы подвергаются дополнительному ударному воздействию от отбойных ребер 7. Корпус мельницы 1 герметизируется для предотвращения выброса пыли наружу.

Основное преимущество такой установки заключается в наращивании энергии удара и возможности многократного ударного столкновения благодаря использованию центробежной силы, возникающей при прохождении частицами радиальных разгонно-ударных и кольцевых отражательных элементов между верхним и нижним рабочими органами. Это позволяет достичь высокой эффективности измельчения. Кроме того, у этой установки отсутствует накопление материала на рабочих элементах, что исключает фиксированное ступенчатое возрастание энергии удара и потерю скорости частиц при переходе между ступенями, что является отличительной особенностью от ступенчатой мельницы

(ЦМВУ). В результате упрощается конструкция мельницы, уменьшается металлоемкость рабочих органов и снижается энергоемкость процесса измельчения. При конструировании рабочих органов мельницы не требуется рассчитывать диаметры ступеней в зависимости от прочностных свойств исходного материала.

2.1.3 Конструктивные особенности центробежной конусной мельницы

В конусной центробежной мельнице изменена форма противоположно вращающихся рабочих органов. Эффективность измельчения увеличивается за счет рационального приложения динамических нагрузок на дезинтегрируемые частицы без непродуктивного гашения скорости частиц. На рисунке 2.4 представлена центробежная конусная мельница [62] в разрезе.

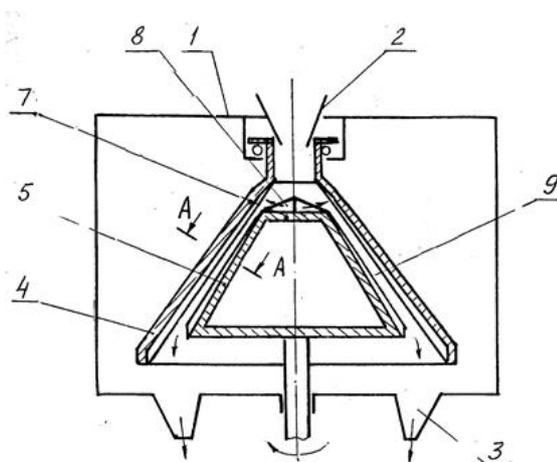


Рисунок 2.4 – Конструкция центробежной конусной мельницы:

- 1- корпус; 2 -загрузочное отверстие; 3 - разгрузочное отверстие; 4 - верхний рабочий орган;
5 - нижний рабочий орган; 6 - ребра; 7 - верхнее основание нижнего рабочего органа;
8 - разгонные ребрышки; 9 – рабочая камера

Центробежная конусная мельница состоит из корпуса 1, верхнего загрузочного 2 и нижнего разгрузочного 3 отверстий, верхнего 4 и нижнего 5 рабочих органов с ребрами 6 V-образной формы, установленных вдоль образующих конусной поверхности, на верхнем основании 7 нижнего рабочего

органа расположены разгонные радиальные ребрышки 8. Рабочая камера между рабочими органами представляет собой воронкообразную полость 9.

Процесс дезинтеграции происходит следующим образом: измельчаемая руда сначала загружается в приемный бункер 2, а затем поступает в мельницу через загрузочную втулку корпуса 1, попадая на верхнее основание вращающегося нижнего рабочего органа 5. Здесь частицы рудного материала получают максимальную радиальную скорость, благодаря радиально установленным разгонным ребрышкам, расположенных на крайней точке основания. Затем эти рудные частицы выбрасываются от основания и подвергаются сильным нормальным ударам на поверхности V-образных радиальных ребер противоположно вращающегося верхнего рабочего органа 4.

Не разрушенные куски рудного материала отражаются по результирующему направлению сообщения ударных сил, центробежного поля и сталкиваются с ребристой поверхностью конусной части нижнего рабочего органа. Не раздробленная часть кусков породы при этом снова отбрасывается в сторону отражающей ребристой поверхности и процесс дезинтеграции продолжается до тех пор, пока частицы дезинтегрируемого материала достигнут нижней крайней точки нижнего рабочего органа и разгрузятся через разгрузочное отверстие корпуса мельницы 3. Корпус герметизируется для предотвращения выброса пыли наружу.

2.2 Методика исследований

2.2.1 Методика экспериментальных исследований на лабораторных центробежных мельницах многократного ударного действия

Целью работы является определение эффективности разрушения рудных материалов и наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность измельчения при многократном динамическом воздействии в лабораторных

центробежных мельницах с разной формой активаторов (ступенчатым, конусным и дисковым).

Задачи исследований:

- изготовление опытных образцов лабораторных моделей центробежных мельниц с разной формой рабочих органов;
- изучение процессов измельчения на центробежных лабораторных мельницах с разными рабочими органами (ступенчатыми, конусными, дисковыми);
- определение рациональных рабочих и конструктивных параметров центробежных лабораторных мельниц;
- обоснование исходных данных для проектирования мельниц.

Лабораторные модели центробежных мельниц с разной формой рабочих органов были изготовлены на экспериментальной базе ИГДС СО РАН.

Вначале была изготовлена модель ступенчатой мельницы с возможностью замены рабочих органов на рабочие органы другой формы (конусной и дисковой).

Общий вид рабочих ступенчатых органов показан на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Общий вид ступенчатых рабочих органов

Общий вид и техническая характеристика лабораторной модели ступенчатой мельницы представлены на рисунке 2.6 и в таблице 2.1.

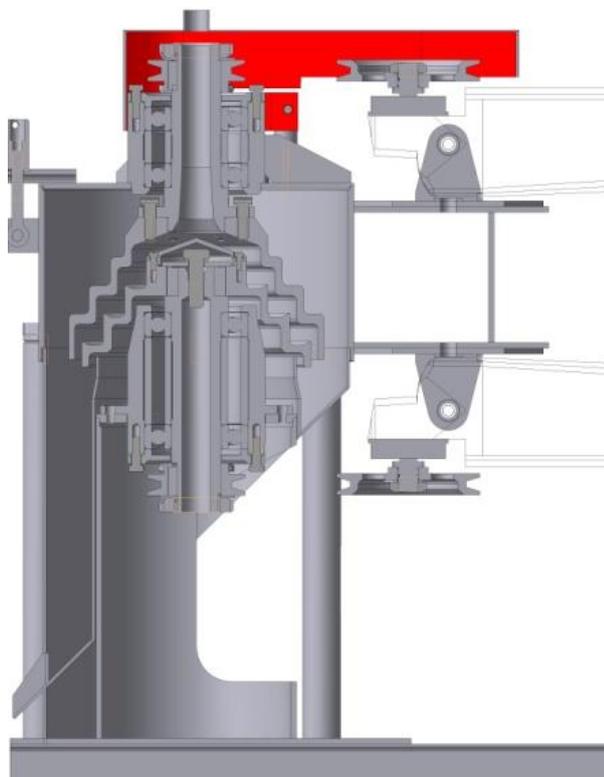


Рисунок 2.6 – Общий вид лабораторной ступенчатой мельницы

Таблица 2.1 – Техническая характеристика лабораторной ступенчатой мельницы

№	Наименование	Показатели
1	Производительность, кг/ч	5-10
2	Крупность исходного питания, мм	-5
3	Размеры рабочих органов: верхнего, мм нижнего, мм	180 160
4	Частота вращения органов, об/мин	800-6000
5	Мощность двигателей, Вт	2300
6	Масса измельчителя, кг	8

Общий вид рабочих органов конусной формы, и техническая характеристика конусной мельницы представлена на рисунке 2.7 и в таблице 2.2. Угол конуса равен 45 градусам, верхняя часть конусного рабочего органа выполнена в виде распределителя для поступающего материала, на нижней части конусного рабочего органа имеются отражательные элементы в виде вертикальных отбойных ребер.



Рисунок 2.7 - Общий вид конусных рабочих органов

Таблица 2.2 – Техническая характеристика лабораторной конусной мельницы

№	Наименование	Показатели
1	Производительность, кг/ч	5-10
2	Крупность исходного питания, мм	-5
3	Размеры рабочих органов: верхнего, мм нижнего, мм	180 160
4	Частота вращения органов, об/мин	800-6000
5	Мощность двигателей, Вт	2300
6	Масса измельчителя, кг	9

Общий вид рабочих органов дисковой формы, и техническая характеристика дисковой мельницы представлены на рисунке 2.8 и в таблице 2.3. Рабочие органы дисковой центробежной мельницы представлены в виде двух противоположно вращающихся дисков с радиальными разгонно-отбойными и отражательными кольцевыми элементами.

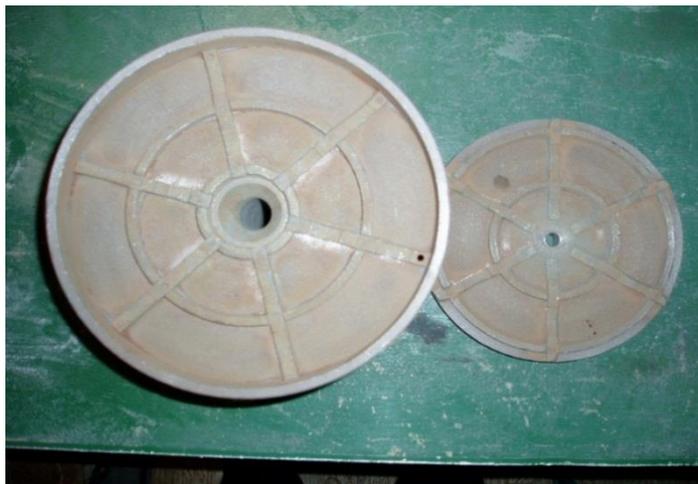


Рисунок 2.8 – Общий вид рабочих органов дисковой формы

Таблица 2.3 – Техническая характеристика дисковой мельницы

№	Наименование	Показатели
1	Производительность, кг/ч	5-10
2	Крупность исходного питания, мм	-5
3	Размеры рабочих органов: верхнего, мм нижнего, мм	180 160
4	Частота вращения органов, об/мин	800-6000
5	Мощность двигателей, Вт	2300
6	Масса измельчителя, кг	5,5

Для определения оптимальных окружных скоростей рабочих органов центробежных мельниц, при которых происходит наиболее эффективное измельчение рудных материалов, производятся следующие действия:

1. Измельчение проб при неподвижном верхнем отражательном рабочем органе, при частоте вращения нижних рабочих органов в диапазоне от 1000 до 7000 об/мин.

2. После определения рациональной окружной скорости нижнего рабочего органа, производится измельчение проб при определенной оптимальной частоте вращения нижнего рабочего органа с противоположно вращающимся верхним рабочим органом в диапазоне от 500 до 3000 об/мин.

Изучение гранулометрического состава продуктов измельчения рудных материалов в лабораторных центробежных мельницах с разной формой активаторов, производится посредством ситового анализа по классам крупности: $-2,5+1,6$ мм; $-1+0,63$ мм; $-0,63+0,315$ мм; $-0,315+0,16$ мм; $-0,16+0,1$ мм; $-0,1+0,063$ мм; $-0,063$ мм. Исходным измельчаемым материалом служит кварцевая руда, крупностью $-2,5+1,6$ мм, масса пробы составляет 200 г. Питание и разгрузка мельницы подвергаются ситовому анализу на ситах с квадратными отверстиями.

Далее производится определение гранулометрического состава исходной руды и продуктов измельчения мельниц. Данные гранулометрического состава переводятся в проценты и заносятся в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Гранулометрический состав пробы

Классы крупности, мм	Выход, %	
	Исходная руда	Продукты измельчения

Применяемое оборудование

1. Лабораторная центробежная мельница со съемными рабочими органами разной формы.
2. Аналитические весы.
3. Ситовой анализатор.
4. Сита с размером ячеек: $-2,5+1,6$ мм; $-1+0,63$ мм; $-0,63+0,315$ мм; $-0,315+0,16$ мм; $-0,16+0,1$ мм; $-0,1+0,063$ мм; $-0,063$ мм.
5. Тахометр.

Обработка результатов натурных исследований

Окончательная обработка результатов проводится после определения необходимого количества проб.

Необходимое количество проб устанавливается на основании заданной величины коэффициента вариации при определенных методах измерений и горнотехнических условиях.

Для расчета необходимого количества проб используется следующая формула /1/:

$$n \geq t^2 \frac{K_{вар}^2}{K_{доп}^2} ,$$

где $K_{вар}$ – коэффициент вариации, %;

$K_{доп}$ – допустимая ошибка, %;

t - нормированное отклонение.

При определении количества проб следует ориентироваться на следующие показатели надежности: для производственных измерений $P=0,80$; для научно-исследовательских измерений $P =0,95$.

Нормируемое отклонение принимается в зависимости от задаваемой надежности и составляет 1,96 при $P =0,95$ (таблица 2.5). Величина допустимой ошибки принимается в размере 10-15%. Коэффициент вариации задается в пределах 15-20%.

Таблица 2.5 – Нормированное отклонение и задаваемая надежность

Нормированное отклонение, t	Задаваемая надежность, a
1,0	0,68
1,04	0,7
1,15	0,75
1,28	0,8
1,44	0,85
1,65	0,9
1,96	0,95
2,0	0,99
2,58	0,995
3,0	0,997
4,0	0,999

Необходимое количество проб будет равно 6 при значении коэффициента вариации 15%, показателя надежности 0,95 и допустимой ошибки 12%.

$$n \geq 1,96^2 \frac{15^2}{12^2} = 6.$$

Полученные экспериментальные данные из весового отношения переводим в проценты (%) и заносим в таблицу 2.4.

По данным таблицы получаем динамику распределения продуктов измельчения на лабораторных центробежных мельницах.

2.3 Исследования в лабораторной центробежной мельнице со ступенчатой формой рабочих органов

Целью данных исследований является определение эффективности разрушения рудных материалов и наиболее значимых факторов, влияющих на эффективность измельчения при многократном динамическом воздействии в лабораторных центробежных мельницах с разной формой активаторов (ступенчатым, конусным и дисковым), в том числе определение характера разрушения однородных частиц с тонковкрапленными минеральными комплексами [75-78].

Для решения поставленной цели необходимо провести экспериментальные исследования по измельчению кусковых рудных материалов.

2.3.1 Влияние числа ступеней на эффективность измельчения

Ступенчатая форма рабочих органов (активатора и отражателя) необходима, во-первых, для создания циркулирующих потоков частиц между противоположно вращающимися рабочими органами, во-вторых для организации последовательного наращивания линейной скорости движения частиц, необходимого для компенсации потери массы частиц по ходу их перемещения в рабочей зоне измельчения, что крайне важно для достижения максимального эффекта разрушения частиц.

На рисунке 2.9 показано образование циркулирующих потоков в рабочей камере ступенчатой мельницы [79]. Предполагается, что циркулирующие потоки формируются на уровне каждой ступени рабочей камеры мельницы, за счет противоположного вращения рабочих органов, вследствие чего измельчаемые частицы испытывают многократные динамические воздействия.

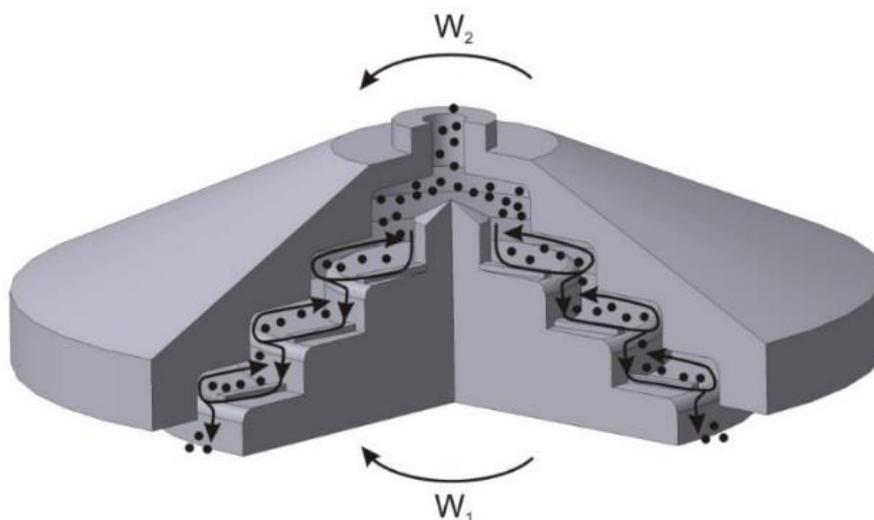


Рисунок 2.9 – Схема образования циркулирующих потоков в рабочей камере центробежной мельницы

Эффект влияния формы рабочих органов на эффективность измельчения можно оценить только проведением специальных экспериментов [80, 81].

Для подтверждения влияния количества ступеней на рабочих органах лабораторной центробежной ступенчатой мельницы на эффективность разрушения рудных материалов, были проведены экспериментальные исследования по измельчению проб в лабораторной модели ступенчатой мельницы с разным количеством ступеней (от 1 до 4 ступеней). Средние значения полученных результатов при измельчении рудного материала (черносланцевой фазы кварц-жильной золотосодержащей руды) крупностью $-2,5+1$ мм при заданных рабочих параметрах мельницы приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Гранулометрический состав продуктов измельчения в лабораторной модели ступенчатой мельницы с разным количеством ступеней

Классы крупности, мм	Выход, %			
	1 ступень	2 ступени	3 ступени	4 ступени
-0,05+0	11,8	22,9	37,8	38,3
-0,25+0,05	22,3	29,1	44,9	42,1
-0,5+0,25	17,9	12,8	8,8	8,1
-1+0,5	21,4	15,6	6,2	6,8
-2,5+1	26,6	19,6	2,3	2

Сравнительные данные по выходу измельченного продукта с разным количеством ступеней представлены на рисунке 2.10.

Из графика (рисунок 2.10) следует, что при увеличении количества ступеней на рабочих органах ступенчатой мельницы, существенно повышается эффективность измельчения рудного материала, которая сопровождается уменьшением выхода классов крупности $-2,5 + 1$ мм и переходом их в более мелкий класс крупности $-0,25 + 0$ мм. При этом характеристики продуктов измельчения при 3-х и 4-х ступенях практически не отличаются, то есть при увеличении числа ступеней более 3-х эффективность измельчения практически не изменяется.

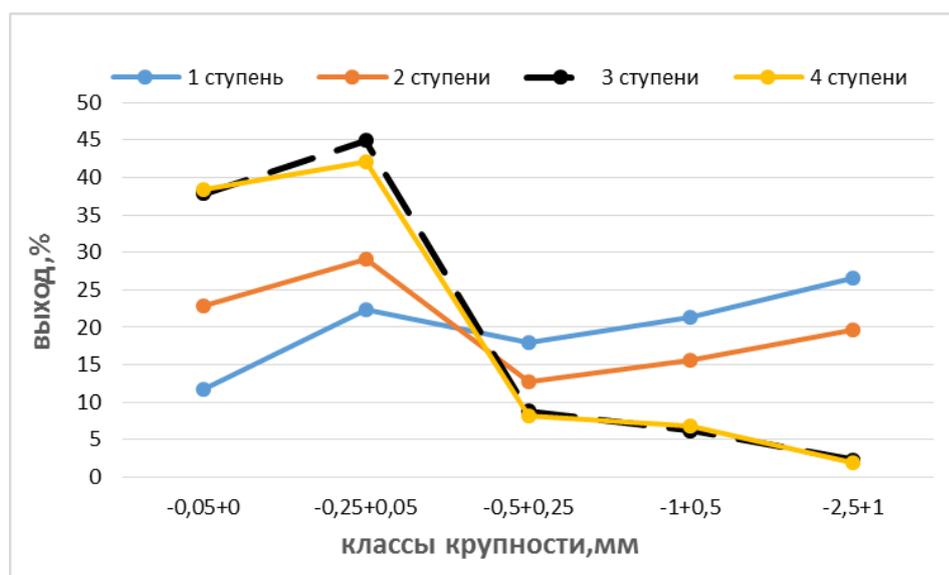


Рисунок 2.10 – Распределение измельченного материала по классам крупности при разном количестве ступеней на рабочих органах мельницы

Это происходит из-за достаточного сокращения крупности измельчаемого материала при заданных физических параметрах динамического воздействия (скорости вращения рабочих органов и их геометрических параметров), при котором разрушаемые частицы достигают такой крупности, при которой сообщаемых скоростей на следующей ступени не хватает для их разрушения. Таким образом наиболее рациональным был признан трехступенчатый вариант мельницы.

2.3.2 Взаимосвязь окружной скорости вращения рабочих органов с эффективностью измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице

Из-за ступенчатой формы рабочих органов, с последовательным увеличением радиусов каждой следующей ступени, скорость движения разрушаемых частиц последовательно увеличивается [82].

В таблице 2.7 показано возрастание скорости столкновения разрушаемой частицы при увеличении окружной скорости вращения нижнего рабочего органа в ступенчатой мельнице с неподвижным верхним рабочим органом.

Таблица 2.7 – Значение скоростей движения разрушаемой частицы при увеличении окружной скорости нижнего рабочего органа

Частота оборотов, об/мин	1 ступень	2 ступень	3 ступень
1000	7,42 м/с	8,95 м/с	11,18 м/с
2000	14,44 м/с	17,94 м/с	22,39 м/с
3000	21,76 м/с	26,92 м/с	33,59 м/с
4000	29,09 м/с	35,89 м/с	44,79 м/с
5000	36,41 м/с	44,87 м/с	55,99 м/с
6000	43,73 м/с	53,84 м/с	67,19 м/с
7000	51,04 м/с	62,82 м/с	78,39 м/с

Окружная скорость вращения рабочих органов в центробежных ударных мельницах является основным фактором, влияющим на эффективность работы мельниц. В этой связи, экспериментальным путем были подобраны рациональные

значения окружных скоростей вращения рабочих органов лабораторной модели ступенчатой мельницы.

В первую очередь, были проведены экспериментальные работы по определению зависимости эффективности измельчения рудных материалов от частоты вращения нижнего рабочего органа при неподвижном отражательном верхнем рабочем органе. Для измельчения использовался исходный рудный материал (кварц) крупностью $-2,5+1,6$ мм.

Средние значения полученных результатов показаны на графике, представленного на рисунке 2.11.

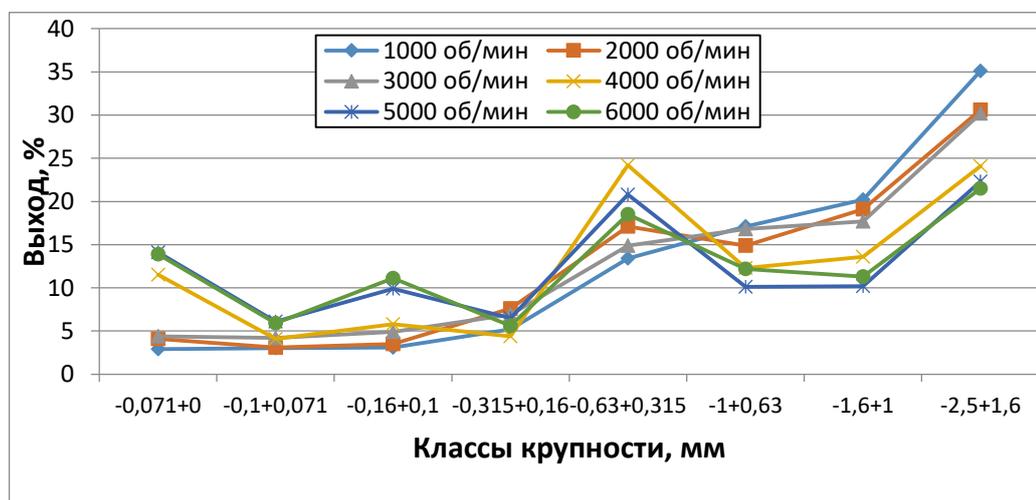


Рисунок 2.11 – Распределение продуктов измельчения при разной окружной скорости нижнего рабочего органа

Установлено, что при увеличении числа оборотов начиная с 4000 об/мин происходит повышение эффективности измельчения (выхода контрольного класса крупности $-0,071$ мм), однако при превышении скорости вращения более 5000 об/мин дальнейшее увеличение эффективности измельчения практически не происходит. Это связано с массовым выносом материала достаточно сильными потоками воздуха, образующимися в рабочей камере мельницы, это подробнее рассмотрено в 3 главе раздел 3.5. Таким образом, наиболее рациональной частотой

вращения нижнего рабочего органа является диапазон скорости вращения до 5000 оборотов в минуту.

Как уже упоминалось выше, особенностью ступенчатого измельчителя является форма противоположно вращающихся рабочих органов, благодаря которой возможна организация циркулирующих потоков частиц измельчаемой руды (рис. 2.12), на уровне каждой ступени, вследствие чего измельчаемые частицы



Рис. 2.12 - Схема циркулирующих потоков в рабочей камере ступенчатой мельницы

подвергаются динамическим нагрузкам не только в процессе многократных ударных нагрузок, но и в процессе самоизмельчения частиц друг с другом. Для определения взаимосвязи окружной скорости вращения рабочих органов с эффективностью измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице необходимо определить наиболее рациональное

соотношение окружных скоростей, противоположно вращающихся рабочих органов.

В следующей серии экспериментальных исследований была определена рациональная частота вращения верхнего рабочего органа. По условию максимального эффекта разрушения экспериментальным путем было определено рациональное соотношение частот, противоположно вращающихся верхнего и нижнего ступенчатых рабочих органов. Полученные сводные результаты с частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазоне с 500 об/мин до 3000 об/мин представлены на рисунке 2.13.

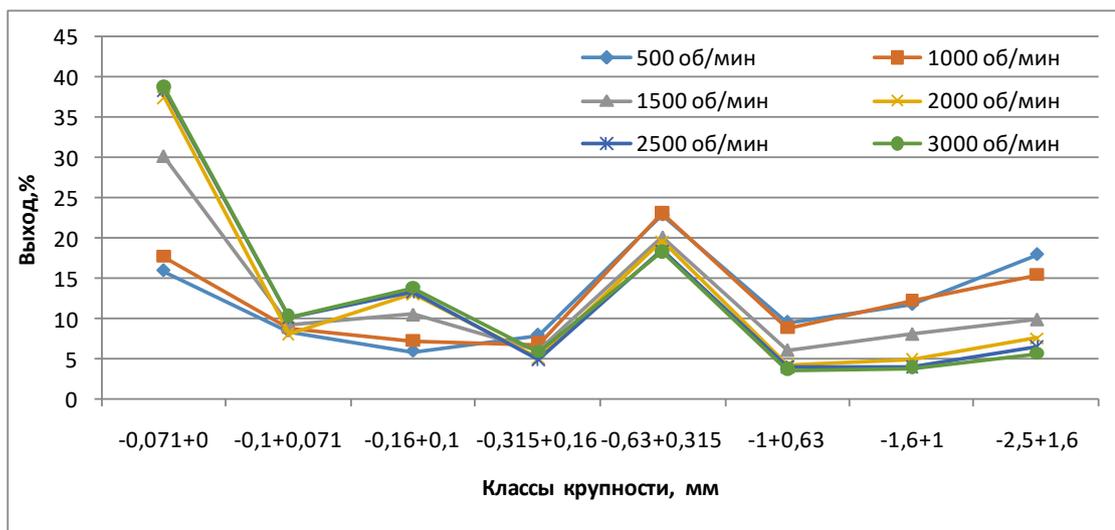


Рисунок 2.13 – Распределение продуктов измельчения при разной окружной скорости верхнего рабочего органа

Из графика, представленного на рисунке 3.8, следует, что при частоте вращения верхнего отражательного рабочего органа более 2000 об/мин, повышения эффективности работы ступенчатой мельницы практически не происходит, это связано с соответствующим увеличением центробежной силы, достаточной для устойчивого прижимания разрушаемых частиц к поверхности верхнего рабочего органа и негативным влиянием образующегося воздушного потока, за счет чего нарушаются условия образования циркулирования потоков измельчаемых частиц в рабочей зоне, образованной между вращающимися рабочими органами.

Таким образом, экспериментальным путем было определено рациональное соотношение частоты вращения нижнего рабочего органа к верхнему 2,5:1. В диапазоне вращения до 5000 об/мин для нижнего и 2000 об/мин верхнего отражательного органа. Данное соотношение, создает необходимые условия для организации интенсивных динамических воздействий на разрушаемые частицы рудного материала в рабочей зоне при создании устойчивых циркулирующих потоков.

При таком соотношении скоростей вращения необходимо рассчитать линейные скорости движения частиц в рабочей камере ступенчатой мельницы.

В таблице 2.8 приведены абсолютные максимальные значения скоростей столкновения частиц в трехступенчатом варианте лабораторной центробежной мельницы, при частоте оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего отражательного рабочего органа 2000 об/мин, полученные расчётным путем.

Таблица 2.8 – Скорости столкновения частиц, при частоте оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего отражательного рабочего органа 2000 об/мин

Число ступеней N	$R_{\text{внутр. м}}$	$R_{\text{внешн. м}}$	Скорость столкновения $V_{\text{столкн.}}, \text{ м/с}$
1	0,05	0,07	51,039
2	0,07	0,09	62,821
3	0,09	0,11	78,397

2.4 Исследования в лабораторной центробежной мельнице с конусной формой рабочих органов

Экспериментальные исследования на центробежной мельнице с конусными рабочими органами проводились аналогично исследованиям на центробежной ступенчатой мельнице. Для измельчения использовался исходный рудный материал (кварц) крупностью -2,5+1,6 мм.

В начале были проведены исследования с разной частотой вращения нижнего рабочего органа с неподвижным отражательным верхним рабочим органом.

По результатам, представленным на рисунке 2.14 видно, что наиболее высокая эффективность измельчения происходит при частоте 6000 об/мин.

При частоте вращения 6000 об/мин происходит интенсивное измельчение верхних классов крупности -2,5+1,6 мм; -1,6+1мм; -1+0,63 мм, с их переходом в мелкие классы крупности -0,1+0,071мм и -0,071+0 мм, при этом, при частоте вращения более 6000 об/мин повышения эффективности измельчения не происходит.

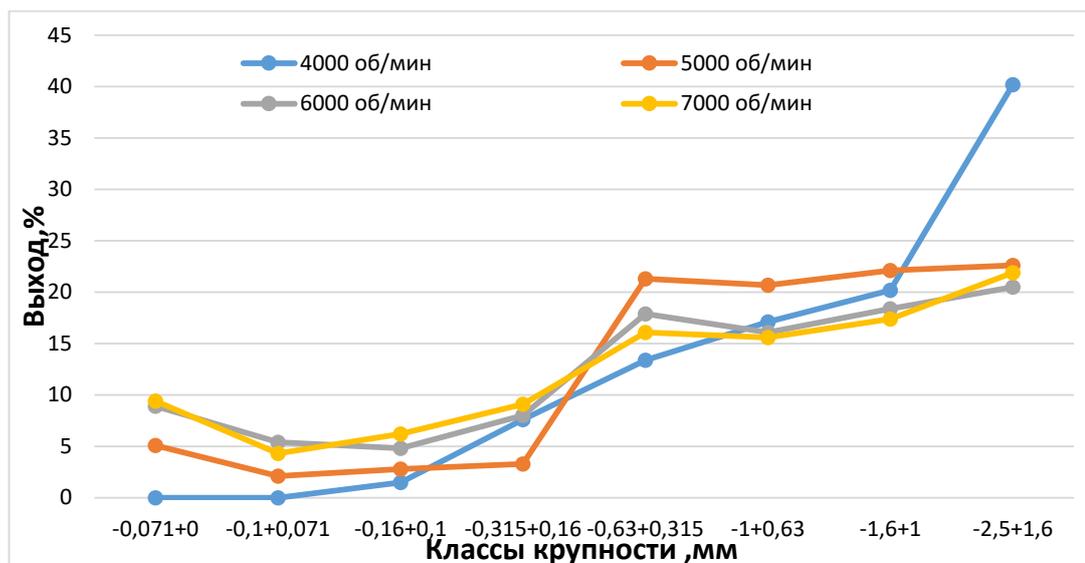


Рисунок 2.14 – Сравнительные характеристики продуктов измельчения при разной окружной скорости нижнего рабочего органа

Предельное значение скорости вращения нижнего рабочего органа выше, чем у ступенчатой мельницы, при котором происходит последовательное увеличение степени измельчения, но в целом, эффективность измельчения уступает значениям, полученным в ступенчатой мельнице, возможной причиной этого может быть то, что при конусной форме рабочего органа нет возможности для образования упорядоченных циркулирующих потоков как в мельнице со ступенчатыми рабочими органами. То есть при конусной форме рабочего органа по сравнению со ступенчатой формой разрушаемые частицы испытывают меньшее количество динамических воздействий, вследствие чего происходит преждевременный вывод измельчаемых частиц из процесса интенсивного измельчения.

Таким образом, диапазон рабочих значений скорости вращения ограничен до 6000 об/мин.

Наиболее рациональные условия соотношения вращения верхнего и нижнего рабочих органов, также определялись по условию достижения максимального эффекта измельчения при значении скорости вращения нижнего рабочего органа с частотой 6000 об/мин. Полученные усредненные результаты с частотой вращения нижнего рабочего органа 6000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазоне с 500

об/ мин до 3000 об/ мин представлены на рисунке 2.15.

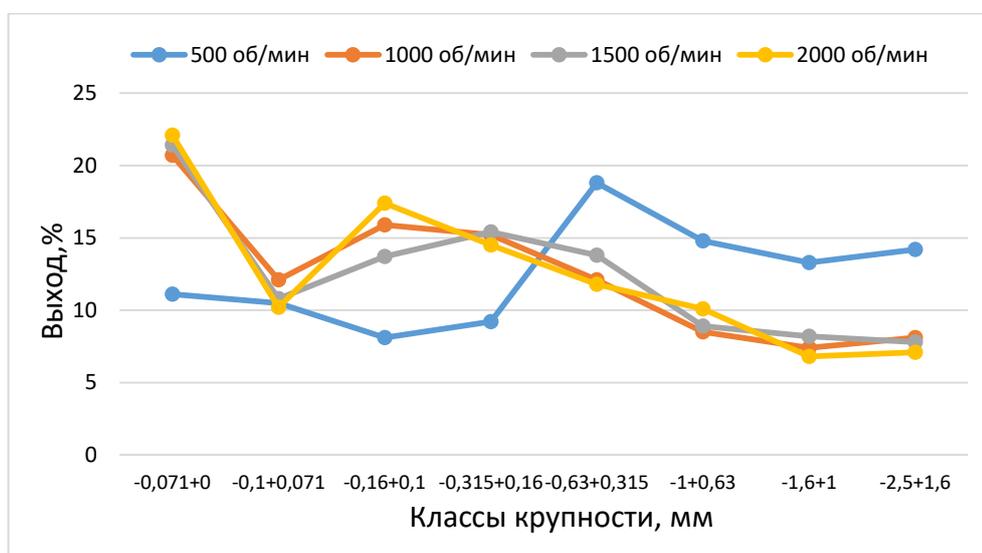


Рисунок 2.15 – Распределение продуктов измельчения при разной окружной скорости нижнего рабочего органа

По гранулометрическим характеристикам продуктов измельчения, представленными на рисунке 2.15, определено, что при превышении частоты вращения верхнего отражательного рабочего органа более чем на 1000 об/мин, заметного повышения эффективности работы ступенчатой мельницы практически не наблюдается, это в два раза меньше рациональной скорости вращения верхнего рабочего органа в ступенчатой мельнице. В данном случае, такой предел эффективности частоты вращения верхнего рабочего органа объясняется тем, что при конусной форме рабочих органов при превышении частоты вращения верхнего рабочего органа более 1000 об/мин в рабочей камере между двумя конусными рабочими органами создаются условия, при которых количество динамических воздействий на разрушаемые частицы уменьшается и происходит их вынос из зоны измельчения образующимися потоками воздуха.

Таким образом, наиболее рациональное соотношение противоположно вращающихся рабочих органов в конусной мельнице составляет 6:1, именно при таком соотношении возрастание центробежной силы и воздушных потоков не

оказывают негативных влияний на эффективность измельчения. При этом стоит отметить, что влияние центробежной силы и воздушных потоков в центробежных мельницах, сильно зависит от формы рабочих органов.

Таким образом, экспериментальным путем было определено наиболее рациональное соотношение частоты вращения рабочих органов конусной мельницы, 6000 об/мин нижнего рабочего органа и 1000 об/мин верхнего отражательного органа, соотношением 6:1.

В таблице 2.9 представлены результаты измельчения натуральных материалов из золотосодержащих руд. Данные результаты были получены экспериментальным путем для определения наиболее рациональных значений частоты вращения рабочих конусных органов для наиболее эффективного разрушения рудных материалов, которые составили для нижнего рабочего конусного органа – 5700 об/мин, для верхнего – 1400 об/мин.

Таблица 2.9 – Результаты измельчения в центробежной конусной мельнице

Кол-во, об/мин	Ø+1 мм		Ø-1+0,5 мм		Ø-0,5+0,25 мм		Ø-0,25+0,1 мм		-0,1 мм	
	г	%	г	%	г	%	г	%	г	%
Верх 1200 Низ 5000	46,5	31	34	23	23,5	15,7	32,5	22	12,5	8,4
Верх 1200 Низ 5400	32,5	21,5	34	23	26	17,4	42	28	15,5	10,4
Верх 1400 Низ 5700	5	3,4	4	2,7	9	6	59	40	53	35,4
Верх 1200 Низ 5700	6	4	5	3,4	9,5	6,4	80	54	45	30
Верх 2400 Низ 5600	34,5	23	30	20	27	18	53	36	5	3,4
Верх 3000 Низ 5000	48,5	33	19,5	13	12,5	8,4	22,5	15	47	32

2.5 Исследования в лабораторной центробежной мельнице с дисковой формой рабочих органов

В дисковой центробежной мельнице установлены два противоположно вращающихся рабочих органа в виде дисков с отбойными и отражательными кольцевыми элементами. Аналогично предыдущим исследованиям с лабораторными центробежными мельницами со ступенчатыми и конусными рабочими органами, первоначально также были проведены экспериментальные работы с разной частотой оборотов нижнего рабочего органа при неподвижном отражательном верхнем рабочем органе.

Полученные результаты измельчения рудного материала (кварца) крупностью $-2,5+1,6$ мм с частотой вращения нижнего рабочего органа в диапазоне от 4000 об/мин до 7000 об/мин представлены на рисунке 2.16.

По гранулометрическим характеристикам продуктов измельчения, представленными на рисунке 2.16, видно, что при увеличении частоты оборотов до 6000 происходит сокращение выхода крупных классов $-2,5+1,6$ мм, $-1,6+1$ мм по причине их перехода в мелкий класс крупности $-0,071+0$ мм.

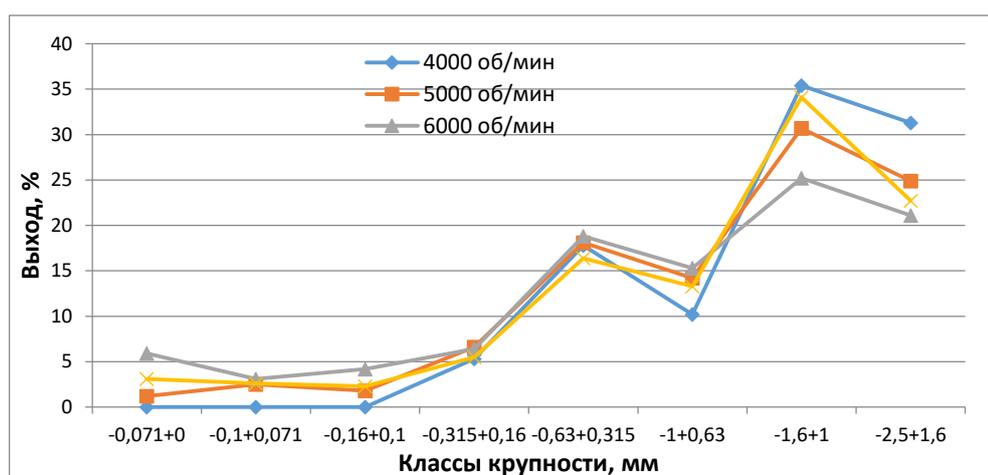


Рисунок 2.16 – Распределение продуктов измельчения при разной окружной скорости нижнего рабочего органа

Однако, при увеличении более 6000 об/мин, эффективность измельчения

понижается. Это объясняется повышением скорости воздушного потока, увеличивающегося с повышением частоты оборотов нижнего дискового рабочего органа. Из-за открытости рабочей камеры между двумя рабочими дисками эффект выдувания неразрушенных частиц оказывает сильное влияние на эффективность измельчения. Из-за повышения скорости воздушного потока, разрушаемые частицы выносятся из зоны измельчения, получая меньшее количество динамических воздействий. Таким образом, частота вращения нижнего рабочего органа в дисковой лабораторной модели была принята равной 6000 об/мин.

Далее были проведены экспериментальные работы по определению рациональной частоты вращения верхнего отражательного рабочего органа, относительно противоположно вращающемуся нижнему рабочему органу.

Полученные результаты с частотой вращения нижнего рабочего органа 6000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазоне с 500 об/мин до 2500 об/мин представлены на рисунке 2.17.

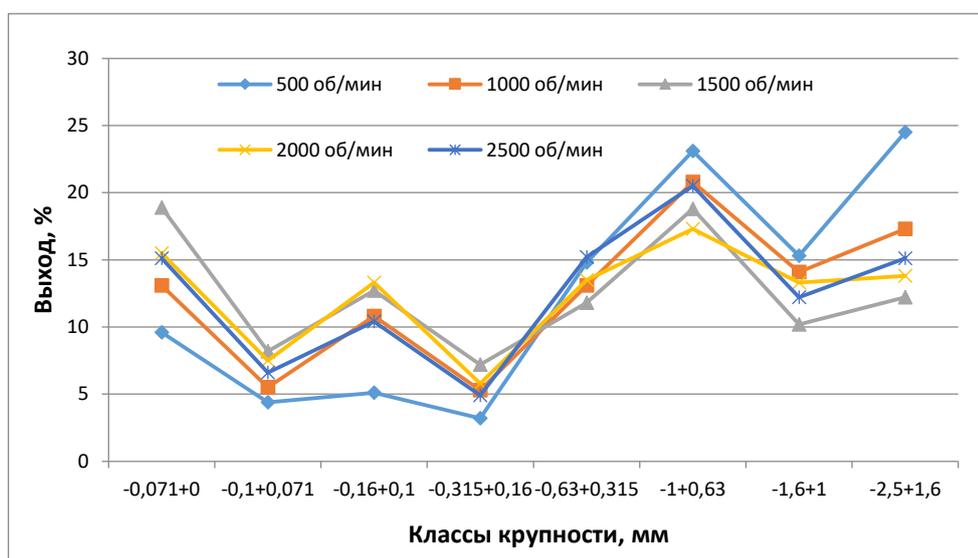


Рисунок 2.17 - Распределение продуктов измельчения при разной окружной скорости верхнего рабочего органа

При частоте вращения верхнего отражательного рабочего органа выше 1500 об/мин, эффективность измельчения дисковой центробежной мельницы

снижается. Это объясняется тем, что при повышении окружной скорости верхнего рабочего органа более 1500 об/мин повышается и сила аэродинамического потока, из-за чего частицы разрушаемого материала получают меньшее количество динамических воздействий с отбойными ребрами.

Таким образом, экспериментальным путем было определено рациональное соотношение частоты вращения рабочих органов дисковой мельницы, 6000 об/мин нижнего рабочего органа и 1500 об/мин верхнего отражательного органа. Далее экспериментальным путем были определены уточненные частоты вращения рабочих дисковых органов для наиболее эффективного разрушения рудных материалов, которые составили для нижнего рабочего конусного органа 5800 об/мин и для верхнего 1500 об/мин.

2.6 Сравнительные лабораторные экспериментальные исследования по измельчению рудных материалов центробежными мельницами с разной конструкцией рабочих органов

Были проведены сравнительные экспериментальные исследования эффективности измельчения в лабораторных вариантах центробежных измельчительных аппаратов с разной конструкцией рабочих органов: со ступенчатым, конусным и дисковым [83, 84]. Исследования проводились согласно методики, приведенной во 2 главе п 2.2 с использованием в качестве исходного материала черносланцевой руды крупностью $-2,5 +1,6$ мм, масса пробы составляла 200 г. Регулируемыми параметрами работы центробежных мельниц является частота оборотов внешнего и внутреннего рабочих органов.

На рисунке 2.18 показаны результаты измельчения оловянного концентрата с исходной крупностью $-2,5+1$ мм в опытных лабораторных измельчителях со ступенчатым (ЦМВУ), дисковым (ЦДИ) и конусными (ЦКИ) активаторами, при одних и тех же значениях скоростей вращения рабочих органов, по рисунку видно,

что наилучшие показатели по эффективности измельчения у мельниц со ступенчатой и дисковой формами рабочих органов.

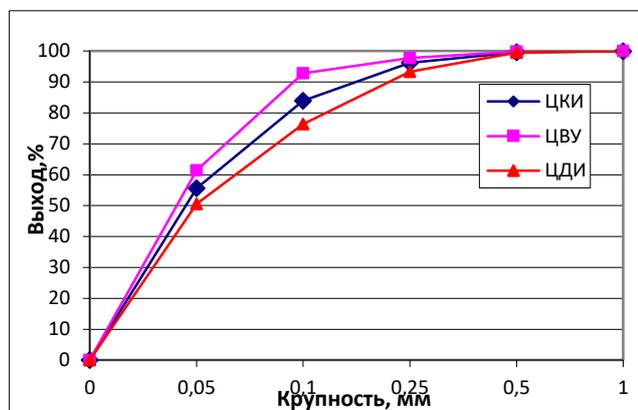


Рисунок 2.18 – Сравнительные суммарные гранулометрические характеристики продуктов дезинтеграции в мельницах с разной формой активаторов

Далее были проведены экспериментальные сравнительные исследования по эффективности измельчения в лабораторных мельницах со ступенчатыми и дисковыми рабочими органами. Результаты измельчения оловянного концентрата с исходной крупностью $-2,5+1$ мм в опытной лабораторной установке дисковой мельницы с диаметром корпуса 250 мм и в лабораторной модели ЦМВУ при ранее выявленных оптимальных значениях скорости вращения верхнего и нижнего рабочих органов показали высокую степень измельчения и показаны в таблице 2.10. Сравнительная гранулометрическая характеристика продуктов измельчения при крупности исходного материала $-2,5+1$ мм приведена на рисунке 2.19.

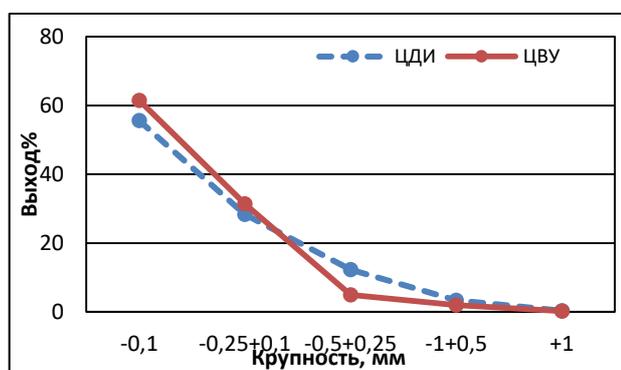


Рисунок 2.19 - Сравнительная гранулометрическая характеристика продуктов измельчения дисковой и ступенчатой мельницы

По гранулометрической характеристике измельченного продукта видно, что эффективность измельчения выше у мельницы со ступенчатыми рабочими органами.

Таблица 2.10 – Результаты работы мельниц

Выход по классам крупности, %	+1 мм	-1+0,5 мм	-0,5+0,25 мм	-0,25+0,1мм	-0,1 мм
Центробежная дисковая мельница	0,35	3,4	12,3	28,3	55,59
Центробежная ступенчатая мельница	0,2	2,0	4,96	31,4	61,44

ВЫВОДЫ

Анализ материала, представленного во второй главе, позволяет сделать следующие выводы:

1. Повышение эффективности измельчения рудных материалов в мельницах с ударным принципом работы достигается за счет организации многократных динамических воздействий в рабочей зоне, образованной между противоположно вращающимися рабочими органами разной формы (ступенчатой, конусной, дисковой).

2. На основе проведенных сравнительных исследований в центробежных мельницах многократного ударного воздействия с разной конструкцией рабочих органов установлено, что наилучшие условия сообщения импульсов частицам для получения наиболее эффективных результатов их дезинтеграции в режиме сообщения многократных динамических воздействий достигаются при ступенчатой форме рабочих органов.

3. Разработанные конструкции центробежных мельниц многократного ударного действия и технологии для сухого измельчения рудных материалов защищены патентами РФ (патенты на изобретение РФ № 2209668, №2198028, № 2416463, № 2746502, №2365411, № 2281809, № 2456100, № 94168).

3 Методика расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного ударного действия и экспериментальные исследования в центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного действия

3.1 Существующие методы исследований по разрушению рудных материалов

В научно-технической литературе есть много информации об исследованиях по разрушению рудных материалов динамическими воздействиями. И каждое исследование имеет соответствующую методику.

В настоящее время существует целое семейство методов испытаний сопротивляемости рудных материалов к разрушению. Наиболее распространенным методом является метод основанный на классификации Барона Л.И. [85].

Рассмотрим некоторые методы, наиболее применяемые при ударном разрушении рудного материала [86-90].

Наиболее известным из них является метод Мартенса.

Метод Мартенса. Основной принцип испытания по этому методу заключается в установлении высоты поднятия груза определенного веса, при сбрасывании с которой испытуемый образец породы разрушается с первого удара. За меру хрупкой прочности принимается величина кинетической энергии, приходящейся на единицу объема образца.

Существуют также методы для испытаний многократными ударами.

Метод Фепля. При испытаниях по данному методу, также предусматривающему использование падающего груза, высоту поднятия последнего увеличивают после каждого удара по формуле:

$$E = Q(n + 1) nh/2 \text{ V кг см/ см}^3 \quad (3.1)$$

где Q — вес падающего груза, кг,

n — число ударов;

h — разность арифметической прогрессии, равная начальной высоте поднятия груза, см;

V — объем образца породы, см³.

Метод Педжа. Испытания проводятся на копре с падающим грузом весом 2 кг, начальная высота поднятия груза 1 см независимо от размеров образца. Для каждого последующего удара высоту поднятия груза увеличивают также на 1 см.

Метод Ф. П. Белянкина предполагает проведение испытаний для определения "усталостной прочности" образца. Сначала на нескольких образцах осуществляется ударный изгиб на маятниковом копре, чтобы определить среднюю величину полной работы разрушения образца A_{cp} , для выбранного интервала высоты поднятия груза h_1 . Затем для других образцов той же породы определяется величина полной работы разрушения A_2 для другого интервала высоты h_2 . После этого производится подсчет по соответствующим формулам:

$$A_{cp} = Q \left(a + \frac{h_0^2}{2h_1} + h_0 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2a}{h_1}} \right), \quad (3.2)$$

$$A_2 = Q \left(a + \frac{h_0^2}{2h_2} + h_0 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2a}{h_2}} \right). \quad (3.3)$$

Вычисленное значение h_2 позволяет оценить предел усталости; сумма h_2 и значения a представляет сопротивляемость разрушению ударом и рассматривается как ударная вязкость.

Метод Шеферда, в свою очередь, основывается на сбрасывании цилиндрического груза весом 2 кг на наковальню весом 1 кг, которая через шарик Бринелля диаметром 10 мм опирается на образец горной породы в форме куба с длиной сторон 40 мм. Высоту падения груза после каждого удара увеличивают на 1 см. Удары наносятся до момента разрушения образца. Значение высоты, при которой происходит разрушение образца, служит мерой сопротивляемости испытываемой породы. Например, для песчаника эта величина составляет 12,8 см.

Для испытаний массового разрушения, определённого количества материалов большее распространение получил *Метод Всесоюзного*

теплотехнического института (ВТИ). Данный способ испытаний, разработанный для оценки механической прочности углей, представляет собой вариант так называемого метода ящичного сбрасывания (подгруппа методов с разрушением однократным ударом без применения дробящего тела). Куски угля размером 50-250 мм загружают в железный ящик размером 750x500x100 мм в таком количестве, чтобы общий вес пробы составил 20 кг. Затем этот ящик сбрасывают с высоты 2 м на твердое основание. После сбрасывания ящик открывают и уголь просеивают через сито с квадратными отверстиями 12,5x12,5 мм. Показателем сопротивляемости разрушению считается выраженный в процентах выход фракции крупнее 12,5 мм.

Работу разрушения при сбрасывании можно подсчитать по формуле:

$$A_{сбр} = h_{сбр} \sum G \text{ кГм}, \quad (3.4)$$

где $h_{сбр}$ — высота сбрасывания, м;

$\sum G$ — суммарный вес кусков в пробе, кг.

В зависимости от цели исследований в каждый метод исследования могут быть внесены изменения и корректировки для его усовершенствования. В этом плане стоит отдельно отметить метод М. М. Протоdjeяконова (младшего), который обычно называют методом толчения, разработанный для быстрого определения крепости угля на шахтах, метод основан на модификации копра К.И. Сыскова и заключается в определении процента образования мелких фракций в процессе измельчения испытываемого материала под действием повторных ударов падающего груза.

Существует целое семейство методов испытаний применительно к стандартным способам дробления и измельчения. Например, в барабанных мельницах, под общим названием «Методы испытания разрушения при вращательном движении».

Из небольшого обзора, выбранного из классификации Барона Л.И., следует заключить, что методов испытаний по разрушению очень много, в зависимости от применения и предмета исследования. При этом, методы, которые как-то

учитывают гранулометрический состав, полученный после разрушения образцов, можно объединить под общим названием как методы испытания на дробимость.

Самим Бароном Л.И. был предложен в качестве универсального критерия разрушаемости свободным ударом показатель дробимости $V_{\text{макс}}$. Методика определения данного показателя проста и сводится к следующему:

1. Испытания проводятся на обычном вертикальном копре. Вес падающего груза 16 кг, высота подъема груза над образцом 50 см; энергия удара 800 кГсм. Ударяющая поверхность ударника плоская.

2. Образцы исследуемых горных пород имеют неправильную форму. Наибольший размер образца должен превосходить наименьший не более чем в два раза. Средний вес образцов около 70 г, допускаемые отклонения от среднего значения лежат в пределах $\pm 15\%$.

3. После удара падающим грузом по образцу тщательно собирают продукты разрушения. Для удобства сбора целесообразно применять металлическую чашку, которую вместе с образцом устанавливают на основании копра.

4. Собранный материал подвергают ситовому анализу. По основному варианту метода испытаний на дробимость требуются два сита с отверстиями диаметрами 7 и 0,25 мм, а по варианту, предназначенному для оценки сопротивляемости руд и пород ударно-поворотному бурению, дополнительно требуется сито с отверстиями диаметром 3 мм.

5. По результатам ситового анализа вычисляют итоговые показатели испытания.

По основному варианту испытаний на дробимость главным критерием сопротивляемости горной породы дроблению принимается выход $V_{\text{макс}}$ дробленого продукта – фракции крупностью – 7 мм, выраженный в кубических сантиметрах, или показатель дробимости горной породы.

6. Выход фракций определяют путем взвешивания на обычных лабораторных весах. Для перехода от весовых к объемным показателям предварительно следует определить объемный вес испытуемой горной породы.

7. Для установления необходимого числа опытов задаются величиной допустимого относительного (в процентах) отклонения $K_{\text{доп}}$ – определяемого критерия дробимости. И проводят несколько параллельных опытов и после проведения статистических расчетов определяют окончательно показатель дробимости $V_{\text{макс}}$.

Вместе с тем показатель дробимости $V_{\text{макс}}$ хотя и широко применяется в расчетных уравнениях при определении результатов дробления и измельчения, может только усредненно учитывать горнотехнологические свойства тех или иных пород. Показатель дробимости не может учитывать масштабность: различие в разрушении крупных и мелких кусков одной и той же горной породы, т.е. особенности макро- и микроструктур.

К сожалению, применительно к разрушению «свободным ударом», метод определения предела прочности горных пород при динамическом растяжении пока никем не разработан, и неизвестно, будет ли, в принципе, подобный параметр пригоден для использования в инженерных расчетах по разрушению таких материалов, как горные породы.

Продолжает оставаться неизученным в количественном, а в значительной степени и в качественном отношении, влияние различных факторов на выход фракций различной крупности при измельчении свободным ударом разнообразных по своим свойствам горных пород.

3.2 Лабораторные стендовые установки по изучению процессов разрушения

В мире существует множество различных конструкций лабораторных стендовых установок, предназначенных для изучения процессов разрушения частиц. Среди них, наиболее известными, являются два типа установок для изучения процессов разрушения способом "свободного удара": отражательные и кинетические [62].

Первый тип установки представляет собой метательное устройство (рисунок 3.1). Оно состоит из следующих элементов: массивной металлической плиты 1, породоуловителя 2, скоростной кинокамеры типа СКС-1М-16 3, сварной квадратной рамы 4, в которой по диагоналям закреплены резиновые шнуры диаметром 15 мм 5. Для метания породных образцов используется зарядный стакан 6, их захватывает устройство 7. Спусковой механизм 8 позволяет перемещать устройство вдоль направляющих станины 9, что регулирует натяжение шнуров и, соответственно, определяет скорость метания образца. Для натяжения шнуров используется натяжная лебедка 10.

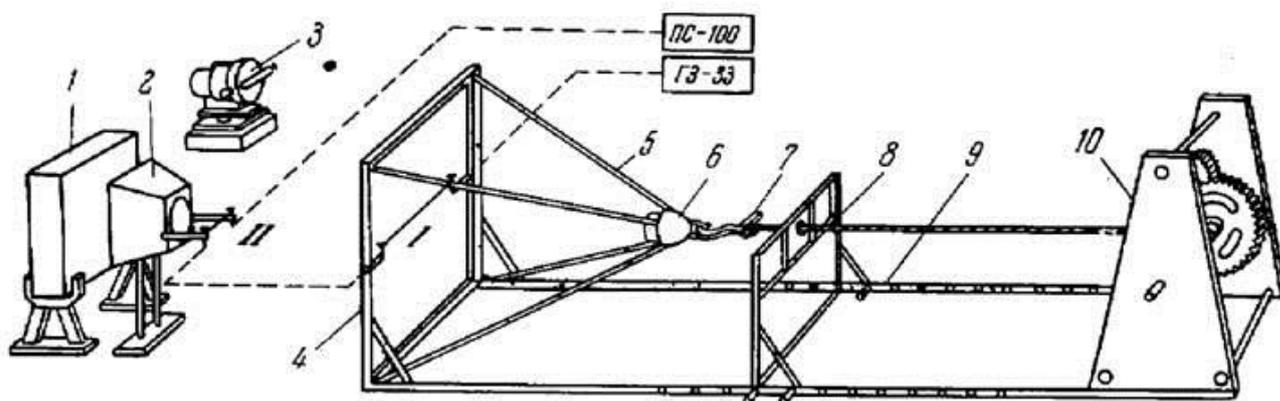


Рисунок 3.1 – Метательное устройство

Для регистрации скорости столкновения образца о плиту используется измерительная система, которая включает проволочные датчики I и II, генератор сигналов типа ГЗ-33 и счетчик импульсов марки ПС-100.

Электрическая схема подключения указанных приборов представлена на рисунке 3.2. В промежуток времени между обрывом I и II датчиков, с низкоомного выхода генератора сигналов, поступали импульсы на счетчик. Показания последнего считывались.

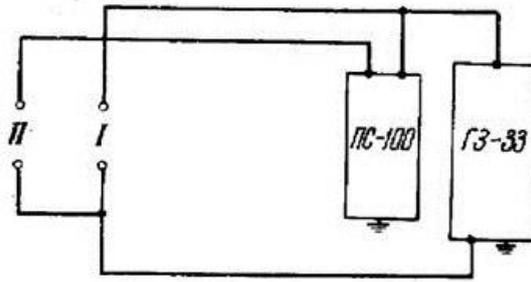


Рисунок 3.2 - Схема подключения

Скорость столкновения определяли по формуле:

$$u = \frac{l f_r}{f_c} \quad (3.5)$$

Где, l равно 150 см, f_r представляет собой частоту сигналов генератора, которая составляла 10000 Гц, а f_c обозначает количество сигналов, зарегистрированных счетчиком импульсов.

Для регистрации скорости встречи образца породы с преградой используется киносъемка, которая работает со скоростью 2500 кадров в секунду. Однако этот метод имеет некоторые недостатки: ограниченность обеспечения высоких значений скоростей и трудности измерения и поддержания стабильности скорости столкновения.

Существует также второй тип установки – ротационный копер, разработанный в ВНИИНе руде [91]. На рисунке 3.3 показан общий вид ротационного копра, который позволяет последовательно измельчать большое количество образцов неправильной формы размером от 10 до 70 мм.

Если на метательной установке разрушение куска материала осуществляется путем удара о неподвижную преграду, то такой подход позволяет исследовать процесс кинетического дробления через одиночный свободный удар. Фактически, этот процесс аналогичен разрушению отдельного куска материала в жесткобильной дробилке.

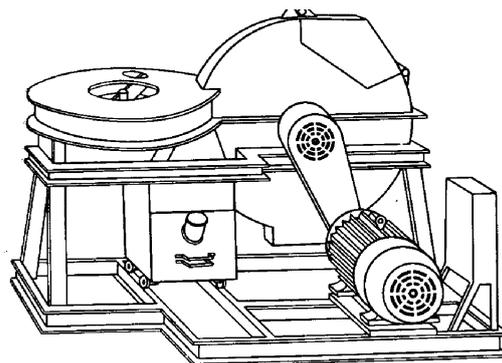


Рисунок 3.3 – Общий вид ротационного копра

Принципиальная схема ротационного копра представлена на рисунке 3.4.

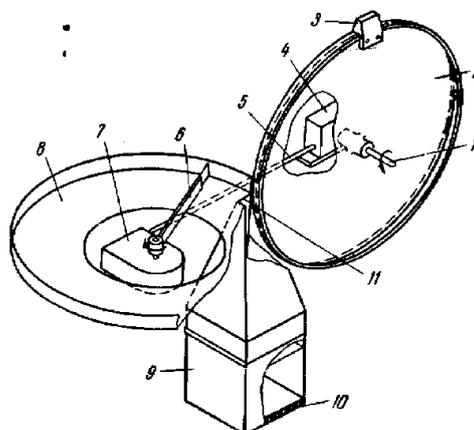


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема ротационного копра

Крутящий момент от электродвигателя передается на ведущий вал 1, на котором расположен ротор 2 с тяжелым билем 3 весом около 8 кг. Вращение ротора синхронизировано с подающим водилом (лопаткой). Крутящий момент с вала 1 передается на вал с лопаткой 6 через редукторы 4 и 7. Оба редуктора имеют передаточное число 1:30, что означает, что лопатка совершает один оборот за каждые 30 оборотов ротора.

В ходе экспериментов образцы размещаются (по одному) на поддоне 8, где они захватываются водилом и перемещаются к прорези 11. Когда образец находится над прорезью, по нему наносится удар билем. Осколки разрушенного образца попадают в приемную камеру 9, заполненную водой. Дно камеры укреплено листом резины 10 толщиной 2 см. Приемная камера предназначена для

замедления скорости разлетающихся частиц разрушенного образца и предотвращения их дальнейшего измельчения.

Основные габаритные размеры установки: длина - 2000 мм, ширина - 1300 мм, высота - 1700 мм, диаметр ротора - 900 мм, вес без электродвигателя - 80 кг. Скорость столкновения регулируется с помощью шкивов на валу электродвигателя и изменения его скорости вращения.

Недостатком данного метода является ограничение начальной крупности исходного материала.

При проведении исследований на лабораторных установках и стендах обычно решаются конкретные задачи. В таких испытаниях используется натуральный размер исходного материала, так как невозможно моделировать процесс разрушения крупных кусков горной породы в мелких частицах из-за масштабных структурных особенностей. Особенно это относится к процессам дробления. Поэтому, как правило, процессы дробления исследуются на установках натуральной величины, а для более детального изучения различных факторов разрушения дробилка может быть немного модернизирована.

Применительно к разработке центробежных измельчителей многократного динамического воздействия возникает необходимость разработки специального стенда и соответствующей методики, позволяющей определять конструктивные и рациональные рабочие параметры центробежных ударных мельниц и прогнозировать гранулометрический состав продуктов измельчения при заданных физико-механических свойствах исходного рудного материала, таких как крупность и крепость.

3.3 Разработка центробежного стенда для изучения разрушения частиц разной крупности и крепости

По результатам проведенных исследований в лабораторных моделях центробежных мельниц с разными рабочими органами, установлена зависимость

эффективности разрушения кусковых рудных материалов от их скорости столкновения с поверхностью рабочих органов. В аппаратах ударного воздействия каждый рудный материал с разной крепостью и крупностью разрушается при разных значениях скоростей, т.е. имеет свою критическую скорость в момент удара, при которой он разрушается. А скорость столкновения частиц с рабочими органами задается числом оборотов рабочих органов.

Для того, чтобы определить вероятную критическую скорость, приводящую к разрушению частицы той или иной крепости и крупности, в лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН был разработан и апробирован экспериментальный центробежный трубчатый стенд (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Общий вид экспериментального центробежного трубчатого стенда

Разработанный нами центробежный трубчатый стенд [92, 93] по своей конструкции относится к отражательному типу лабораторных стендовых установок по изучению процессов разрушения способом «свободного удара». У известных стендов отражательного типа главным недостатком является ограничение обеспечения высоких значений скоростей полета частиц, а также трудности измерения и обеспечения стабильности скорости полета. В отличие от традиционных подходов в известных метательных стендах с использованием сложной системы электродатчиков и скоростной видеосъемки в разработанном нами центробежном трубчатом стенде конструкция значительно упрощена. На

стенде, частица определенной крупности, выбрасываясь, при заданной скорости вращения из центробежного трубчатого активатора испытывает ударные нагрузки о неподвижную броню.

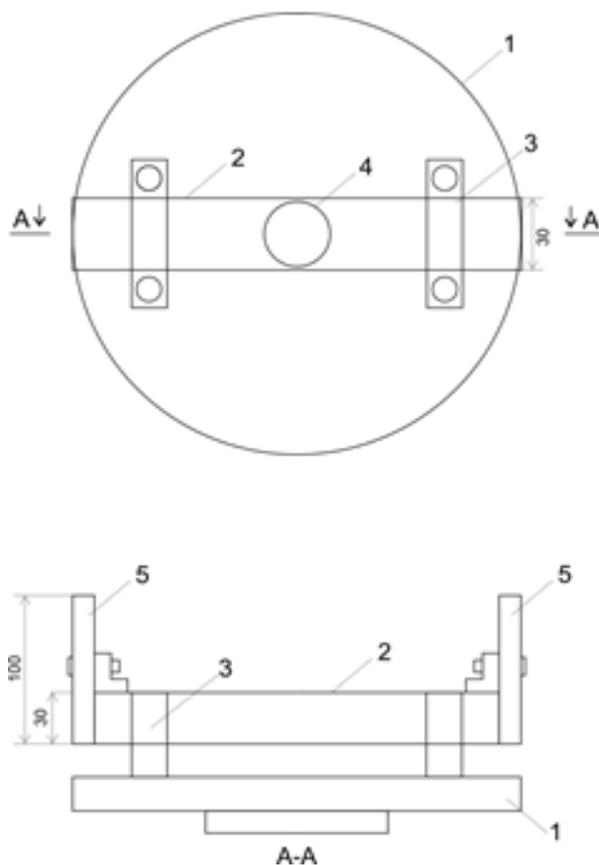


Рисунок 3.6 – Принципиальная схема центробежного трубчатого стенда:

1 - центробежный диск; 2 – трубчатый активатор; 3 – крепления; 4 – загрузочное отверстие; 5 – открывающиеся заглушки

Экспериментальный стенд (рисунок 3.6) представляет собой трубчатый активатор 2 с открывающимися заглушками 5 и с загрузочным отверстием 4, закрепленную креплениями 3 на рабочем центробежном диске 1 с регулируемой скоростью вращения.

При заданной скорости вращения рабочего диска заглушки открываются, и частица под действием центробежной силы выбрасывается из трубчатого активатора и испытывает удар о неподвижную броню. После каждого эксперимента методом ситового анализа определялась степень уменьшения

геометрических размеров рудной частицы после столкновения с неподвижной стенкой.

Испытания проводились по следующей методике:

- частота вращения центробежного активатора составляла 1000 - 8000 об/мин;
- для проведения экспериментальных работ отбирались рудные частицы с разной крепостью по шкале Протодяконова и крупностью от 1 до 10 мм;
- зазор между неподвижной броней и центробежным активатором составлял 20 мм;
- за критерий разрушения единичного куска принято условие сокращения крупности более чем в два раза, определяемое после столкновения частицы с неподвижной стенкой;
- замеры частоты вращения ротора и напряжения производились в режиме реального времени.

Для получения достоверных результатов испытаний проводится серия экспериментов с последующей статистической обработкой, определяется средняя погрешность экспериментальных опытов для кускового материала определённой крупности по стандартным методикам.

Скорость вылета частицы вычислялась по формуле:

$$W = (2\pi nR) / 60, \text{ м/с} \quad (3.6)$$

n – частота, оборотов в мин;

R - радиус рабочего органа, м.

Статистический анализ результатов с целью оценки достоверности проводили также по стандартной методике. Определяется необходимое количество испытаний, достаточного для допустимых пределов погрешности.

В среднем для данного стенда, при диапазоне крупности частиц от 1 до 10 мм достаточное количество испытаний составляет от 5 до 8 раз.

В результате проведенных исследований на стенде и апробирования методики испытаний получены данные по некоторым значениям критических

скоростей столкновения (м/с) для частиц разной крупности и крепости, приводящие к разрушению частиц, которые представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты разрушения частиц разной крупности и крепости на центробежном лабораторном стенде

Крупность, мм	Средней крепости, $f-4$	Довольно крепкие породы, $f-6$	Крепкие породы, $f-10$	Очень крепкие породы, $f-15$	В высшей степени кр. породы, $f-20$
1	44,8 м/с	48,8 м/с	56,3 м/с	65,8 м/с	73,1 м/с
2	35,8 м/с	42,8 м/с	46,5 м/с	58,1 м/с	66,6 м/с
3	32,1 м/с	37,2 м/с	41,1 м/с	52,3 м/с	61,3 м/с
4	26,7 м/с	33,1 м/с	36,4 м/с	46,3 м/с	55,1 м/с
5	21,5 м/с	26,2 м/с	30,1 м/с	40,2 м/с	48,2 м/с
6	17,8 м/с	21,9 м/с	26,1 м/с	35,9 м/с	42,7 м/с
7	16,1 м/с	18,4 м/с	24,2 м/с	32,3 м/с	37,1 м/с
8	14,3 м/с	16,5 м/с	21,3 м/с	28,6 м/с	32,8 м/с
9	11,3 м/с	13,9 м/с	17,7 м/с	25,1 м/с	28,4 м/с
10	8,8 м/с	12,2 м/с	14,8 м/с	22,3 м/с	25,2 м/с

Исходя из экспериментальных данных получены следующие зависимости разрушения частиц от крупности и крепости при разных скоростях столкновения с неподвижной стенкой (рисунок 3.7).

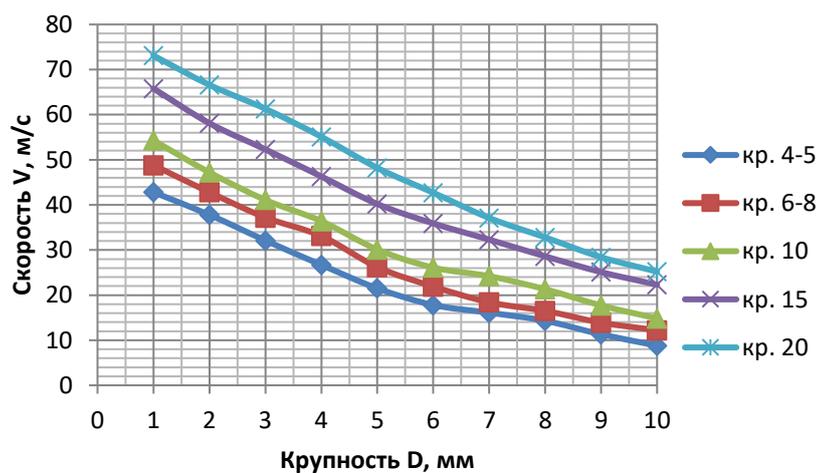


Рисунок 3.7 – Диаграммы разрушения частиц разной крупности и крепости от скорости столкновения

В таблице 3.2 представлена линейная зависимость $\ln(V)$ от крупности частиц. Из таблицы 3.2 видно, что коэффициенты корреляции для разных значений крепости близки к единице, это нам позволяет сделать вывод о линейной зависимости $\ln(V)$ от крупности частиц.

Таблица 3.2 – Линейная зависимость $\ln(V)$ от крупности частиц

Крепость частиц по шкале Протодьяконова	Уравнение зависимости V от D $\ln(v)=a+bD$	Коэффициент корреляции
4	$\ln(V)=3,96-0,17D$	-0,98
6	$\ln(V)=4,07-0,15D$	-0,97
10	$\ln(V)=4,13-0,14D$	-0,96
15	$\ln(V)=4,30-0,12D$	-0,98
20	$\ln(V)=4,45-0,12D$	-0,98

Для удобства дальнейших расчетов по определению необходимой скорости столкновения при разрушении частиц разной крупности и крепости о неподвижную броню, таблица 3.2 (с помощью макроса на языке VBA Excel) была сведена к функции двух переменных (крупности и крепости).

$$V = \exp(a(f) + b(f)D)$$

(Коэффициенты линейной регрессии a , b в макросе интерполировались от крепости линейно).

Поле для ввода исходных данных в программе представлено в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Общий вид матрицы для ввода исходных данных

Крупность, мм	Крепость, ед	Скорость, м/с
4	6	34,6

Как видно из таблицы 3.3 например, для сокращения (разрушения) крупности более чем в два раза частицы крупностью 4 мм и крепостью $f=6$ необходимо обеспечить скорость столкновения воздействия на частицу 34,6 м/с, а для ее дальнейшего разрушения до 0,5 мм необходимо обеспечить скорости столкновения воздействия на частицу по ступеням: 34,6 м/с; 42,8 м/с; 48,8 м/с. Моделирование

процесса последовательного разрушения частицы может быть использовано для расчета рабочих параметров работы рудоразмельных аппаратов [94, 95].

3.4 Методика расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного ударного действия

Полученные критические скорости столкновения частиц (м/с) разной крупности и крепости на центробежном стенде, приводящих к разрушению части, могут быть использованы для расчета рабочих параметров в предложенных конструкциях центробежных мельниц [96-101].

Расчеты могут быть произведены для всех трех типов центробежных мельниц, однако наиболее показательным будет пример расчета для мельницы со ступенчатой формой рабочих органов [102, 103].

Например, на рисунке 2.2. в п.п. 2.1.1 представлена конструкция лабораторной центробежной трехступенчатой мельницы, которая позволяет сообщать частицам разрушаемого материала многократные динамические воздействия за счет противонаправленных импульсов верхним и нижним рабочими органами, где скорость столкновения частиц с поверхностью рабочих органов последовательно увеличивается.

Было произведено несколько попыток рассчитать, вычислить скорость столкновения разрушаемой частицы в трехступенчатой мельнице.

Приближенно считалось, что по принятой кинематике движения частиц в рабочей зоне (между нижним и верхним рабочими органами) центробежной мельницы скорость столкновения равна алгебраическому сложению линейных скоростей частицы после вылета из кромки ступеней дискового активатора в точке столкновения с отражающей поверхностью противоположно вращающегося рабочего органа. А именно для каждой ступени, частицы при отрыве от каждой ступени приобретают следующие нарастающие линейные скорости $V_{\text{верх}}$ и $V_{\text{низ}}$.

$$V_{\text{низ}} = 2\pi \cdot n \cdot R_{\text{низ}} \text{ и } V_{\text{верх}} = 2\pi \cdot n \cdot R_{\text{верх}} \quad (3.7)$$

где $n_{\text{низ}}$ – частота вращения нижнего диска;

$n_{\text{верх}}$ – частота вращения верхнего диска.

Суммарная скорость встречного удара в каждой ступени представляет собой алгебраическую сумму $V_{\text{удара}} = V_{\text{низ}} + V_{\text{верх}}$.

Далее были произведены более точные расчеты скорости столкновения частиц с рабочими органами центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия с учетом геометрических размеров рабочих органов лабораторной модели и режимных параметров рабочих органов (скорости вращения), которые подтвердились высокой сходимостью с экспериментальными данными полученным на лабораторном стенде с центробежным активатором. Для выполнения расчетов за основу была взята методика В. С. Францкевича, Д.Н. Боровского [104] с ее адаптацией к случаю вращения 3-х ступенчатого диска.

Часто эту задачу упрощают до прямолинейного движения под воздействием силы трения и центробежной инерционной силы. На самом деле частицы движутся по некоторой криволинейной траектории.

Уравнение динамики несвободной материальной точки является подходящим для описания движения твердой частицы по вращающемуся диску:

$$m\bar{a} = \sum \bar{F}_i + \bar{N}, \quad (3.8)$$

где m – масса частицы, кг;

a – абсолютное ускорение частицы, м/с^2 ;

F_i – активные силы, действующие на частицу, Н;

N – нормальная реакция, Н.

Здесь активными силами являются сила тяжести

$$G = mg \quad (3.9)$$

и сила трения

$$F_{\text{тр}} = fN = fmg, \quad (3.10)$$

где f – коэффициент трения скольжения частицы по диску.

При рассмотрении движения в плоскости диска, перпендикулярные к ней сила тяжести и нормальная реакция не оказывают влияния на характер движения. Таким образом, для абсолютного движения вдоль плоскости диска уравнение (3.8) будет принимать следующий вид:

$$m\bar{a} = \bar{F}_{\text{тр}}. \quad (3.9)$$

Движение частицы по диску можно рассматривать как сложное, включающее переносное и относительное движения. Для определения характера движения частицы по диску примем полную скорость движения частицы как V . В системе координат O_{yr} (рисунок 3.8), переносное движение представляет собой поворот системы координат на угол φ со скоростью V_φ , а относительное движение - движение частицы вдоль оси r со скоростью V_r .

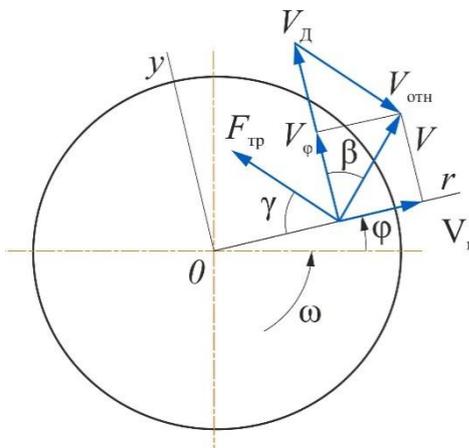


Рисунок 3.8 – Расчетная схема движения частицы по вращающемуся диску

Формула (3.10) позволяет определить абсолютное ускорение частицы в векторной форме:

$$\bar{a} = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_r + \bar{a}_c, \quad (3.10)$$

где a_e^n – переносное нормальное ускорение, м/с^2 ;

a_e^τ – переносное касательное ускорение, м/с^2 ;

a_r – относительное ускорение, м/с²;

a_c – кориолисово ускорение, м/с².

При учете выражения для ускорения (3.10), уравнение движения (3.9) в проекциях на оси координат r и u примет следующий вид:

$$\begin{cases} m(a_r - a_e^n) = -F_{\text{тр}} \cos \gamma, \\ m(a_e^\tau - a_c) = F_{\text{тр}} \sin \gamma, \end{cases} \quad (3.11)$$

где γ – угол между вектором силы трения и осью r .

Направление вектора силы трения совпадает с вектором разности скоростей движения точки диска и частицы, обозначенного как $\vec{V}_{\text{отн}}$:

$$\vec{V}_{\text{отн}} = \vec{V}_d - \vec{V}, \quad (3.12)$$

где V – вектор полной скорости частицы, м/с;

V_d – вектор скорости точки диска, совпадающей с частицей, м/с.

$$V_d = \omega r, \quad (3.13)$$

где ω – угловая скорость диска, рад/с;

r – текущий радиус, м.

Тригонометрические функции угла γ вычисляются на основе расчетной схемы (рисунок 3.8) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{V_a - V_\varphi}{|\vec{V}_a - \vec{V}|} = \frac{\omega r - r \frac{d\varphi}{dt}}{\sqrt{\left(\omega r - r \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dr}{dt}\right)^2}}, \\ \sin \gamma &= \frac{V_r}{|\vec{V}_a - \vec{V}|} = \frac{\frac{dr}{dt}}{\sqrt{\left(\omega r - r \frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dr}{dt}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Ускорения, входящие в уравнение (3.11), определяются по формулам:

$$a_e^n = r \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2, \quad a_e^\tau = r \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \quad a_c = 2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{dr}{dt}. \quad (3.15)$$

С учетом предыдущего уравнения движения (3.11), они преобразуются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right) = -fmg \frac{\omega r - r \frac{d\varphi}{dt}}{\sqrt{\left(\omega r - r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2}}, \\ m \left(r \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{d\varphi}{dt} \frac{dr}{dt} \right) = fmg \frac{\frac{dr}{dt}}{\sqrt{\left(\omega r - r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2}}. \end{array} \right. \quad (3.16)$$

После деления на массу и переноса всех производных первого порядка в правую часть, мы получаем систему уравнений движения частицы по вращающемуся диску, обозначенную как (3.17).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 r}{dt^2} = r \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - fg \frac{\omega r - r \frac{d\varphi}{dt}}{\sqrt{\left(\omega r - r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2}}, \\ \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{2}{r} \frac{d\varphi}{dt} \frac{dr}{dt} + \frac{fg}{r} \frac{\frac{dr}{dt}}{\sqrt{\left(\omega r - r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2}}. \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Для решения полученной системы уравнений используем математический пакет MathCad. Мы определяем составляющие полной скорости V_r и V_φ для движения частицы по диску и строим соответствующие графические зависимости.

Далее, используя найденные составляющие, определяем полную скорость частицы по диску согласно формуле 3.18 и строим графическую зависимость ее изменения от времени:

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_\varphi^2}. \quad (3.18)$$

В заключительной части производим определение угла отрыва β частицы с диска, основываясь на расчетной схеме (рисунок 3.8):

$$\cos\beta = \frac{V_{\Phi}}{V}. \quad (3.19)$$

Далее приведены результаты расчетов определения скорости вылета разрушаемой частицы в трехступенчатом варианте мельницы, при разной частоте оборотов рабочих органов (внешнего и внутреннего) с радиусом внутреннего рабочего органа: 0,05; 0,07; 0,09 м.

Для упрощения вычисления скоростей столкновения частиц в мельнице со ступенчатым активатором с разными параметрами (радиусом рабочих органов, с разной частотой вращения) можно проводить вычисления с помощью программы *MathCad*. То есть, меняя исходные данные – радиус рабочих органов или частоту вращения рабочих органов, можно вычислять скорость столкновения частицы в ступенчатой мельнице.

Например, задав в *MathCad* исходные данные и начальные условия для расчета:

Первая ступень

$x1 := 0$	$r0 := 0.003$	начальный радиус	
$n := 7000$	частота вращения, об/мин	$vr0 := 0.001$	начальная нормальная скорость частицы
$r := 0.05$	радиус диска	$\varphi0 := 0$	начальный угол
$k := 0.3$	коэффициент трения	$v\varphi0 := 0$	начальная тангенциальная скорость частицы
$\omega := \pi \cdot \frac{n}{30}$	угловая скорость	$x2 := \frac{160}{n}$	Расчетное время

Вторая ступень

$x1 := 0$		$r0 := 0.05$	начальный радиус
$n := 7000$	частота вращения, об/мин	$vr0 := 0.001$	начальная нормальная скорость частицы
$r := 0.07$	радиус диска	$\varphi0 := 0$	начальный угол
		$v\varphi0 := 0$	начальная тангенциальная скорость частицы

$$\omega := \pi \cdot \frac{n}{30} \quad \text{угловая скорость} \quad x2 := \frac{9.4}{n} \quad \text{Расчетное время}$$

Третья ступень

$x1 := 0$		$r0 := 0.07$	начальный радиус
$n := 7000$	частота вращения, об/мин	$vr0 := 0.001$	начальная нормальная скорость частицы
$r := 0.09$	радиус диска	$\varphi0 := 0$	начальный угол
		$v\varphi0 := 0$	начальная тангенциальная скорость частицы

$$\omega := \pi \cdot \frac{n}{30} \quad \text{угловая скорость} \quad x2 := \frac{7.8}{n} \quad \text{Расчетное время}$$

Получаем решение задачи в пакете *MathCad*:

Полная скорость частицы на выходе с диска

$$V := \sqrt{(V_{49,0})^2 + (\psi_{49,0})^2} \quad V = 51.039$$

Полная скорость частицы на выходе с диска

$$V := \sqrt{(V_{49,0})^2 + (\psi_{49,0})^2}$$

$$V = 62.821$$

Полная скорость частицы на выходе с диска

$$V := \sqrt{(V_{49,0})^2 + (\psi_{49,0})^2} \quad V = 78.397$$

В таблице 3.4 приведен расчет скорости столкновения частицы для трехступенчатого варианта мельницы, при частоте оборотов верхнего рабочего органа 2000 об/мин и 5000 об/мин нижнего. Это наиболее выгодное соотношение скоростей вращения верхнего рабочего органа к нижнему (1:2,5), которое ранее было выявлено экспериментальным путем.

Таблица 3.4 – Расчет скорости столкновения частицы в лабораторной центробежной мельнице при частоте оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа 2000 об/мин

Число ступеней N	R _{ниж.м}	R _{верх.м}	Скорость столкновения V _{ст.} , м/с
1	0,05	0,07	51,039
2	0,07	0,09	62,821
3	0,09	0,11	78,397

Скорость столкновения на первой ступени составила – 51,039 м/с; на второй – 62,821 м/с; на третьей – 78,397 м/с.

Такой скорости удара достаточно для измельчения частиц высшей степени крепких пород (крепостью f-15 по шкале Протодьяконова) исходным размером 4 мм с выходом измельчённого продукта размером 0,5 мм.

В таблицах 3.5 и 3.6 приведены расчеты скорости столкновения, необходимой для разрушения частиц крепких пород (крепостью f -10 по шкале Протодьяконова) и для разрушения частиц средней крепости (крепостью f -4 по шкале Протодьяконова).

Таблица 3.5 – Расчет скорости столкновения в лабораторной центробежной мельнице при частоте оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего 500 об/мин (для крепких пород f-10)

Число ступеней N	R _{ниж.м}	R _{верх.м}	Скорость столкновения V _{ст.} , м/с
1	0,05	0,07	40,071
2	0,07	0,09	49,358
3	0,09	0,11	61,567

Таблица 3.6 – Расчет скорости столкновения в лабораторной центробежной мельнице при частоте оборотов нижнего рабочего органа 4200 об/мин (для пород средней крепости f-4)

Число ступеней N	R _{ниж.м}	R _{верх.м}	Скорость столкновения V _{ст.} , м/с
1	0,05	0,07	30,557
2	0,07	0,09	37,689
3	0,09	0,11	47,036

По полученным результатам расчетов видно, что в ступенчатой мельнице происходит возрастание скоростей столкновения разрушаемых частиц. То есть, благодаря конструкции центробежного активатора в одной рабочей камере

мельницы последовательно происходит возрастание скоростей столкновения разрушаемых частиц, при этом, имеется возможность за счет варьирования частоты оборотов рабочих органов и радиуса ступеней подбирать различные величины скоростей столкновения для эффективного и рационального разрушения рудных материалов в зависимости от их физико-механических свойств.

Таким образом, при измельчении материала в трехступенчатом варианте центробежной мельницы (или в любой другой центробежной ударной установке) зная скорость столкновения, необходимой для разрушения частиц разной крепости и крупности можно рассчитать наиболее рациональные рабочие режимы и параметры рудоразмольного оборудования.

Проведенные экспериментальные работы на трехступенчатой центробежной мельнице показали хорошую сходимость с расчетными данными по этой методике.

3.5 Зависимость эффективности измельчения рудных материалов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице от параметров рабочей камеры и скорости воздушного потока в ней при разных окружных скоростях вращения рабочих органов мельницы

С целью повышения эффективности работы ступенчатой мельницы за счет определения её рациональных параметров с учетом влияния на процесс измельчения воздушного потока были проведены экспериментальные исследования по определению зависимости эффективности измельчения от скорости воздушного потока, который имеет тенденцию увеличения с ростом числа оборотов рабочих органов (верхнего и нижнего) [105, 106].

При экспериментальных исследованиях в лабораторной ступенчатой мельнице использовалась черносланцевая руда крупностью -2,5+1,6 мм.

В таблице 3.7 представлены значения скоростей воздушного потока при разной окружной скорости вращения верхнего рабочего органа в ступенчатой

мельнице с наиболее рациональной частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин.

Таблица 3.7 – Значения скоростей воздушного потока при разной скорости вращения верхнего рабочего органа

Частота оборотов, об/мин	Скорость возд. потока, м/с
500	8,22 м/с
1000	8,89 м/с
1500	9,14 м/с
2000	9,49 м/с
2500	10,11 м/с
3000	11,42 м/с

Выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм с частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазон с 500 об/ мин до 3000 об/ мин представлен на рисунке 3.9.

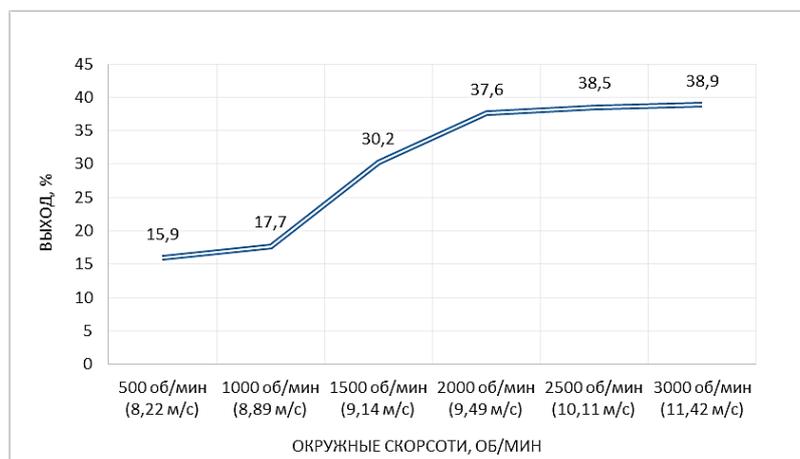


Рисунок 3.9 – Выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм при разной окружной скорости верхнего рабочего органа

По полученным результатам, представленным на рисунке 3.9 установлено, что при увеличении числа оборотов начиная с 1500 об/мин происходит повышение измельчения, характеризующееся увеличением выхода класса крупности $-0,63+0,315$ мм. При 2000 об/мин повышения эффективности измельчения практически нет. Такой предел эффективности измельчения происходит из-за

увеличения скорости воздушного потока в рабочей камере ступенчатой мельницы, который выносит из зоны измельчения неразрушенные частицы геоматериала. Таким образом, экспериментальным путем был определен предел скорости воздушного потока в рабочей камере лабораторной ступенчатой мельницы до 10 м/с, при превышении которого нарушаются условия образования циркулирования потоков измельчаемых частиц, вследствие чего эффективность измельчения снижается.

Формирование воздушного потока в рабочей камере мельницы зависит от скорости вращения и формы рабочих органов, а также от величины зазора между верхними и нижними рабочими органами. Последний фактор является наиболее важным. В целом, формирование воздушных потоков негативно сказывается на процесс измельчения, что заключается в нивелировании ударных нагрузок на частицы и выноса их из рабочей камеры измельчения.

Для исследования влияния зазоров между рабочими органами на эффективность измельчения в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице были проведены экспериментальные исследования.

В лабораторной мельнице с возможностью регулировки высоты рабочей камеры (зазора между рабочими органами) подвергались измельчению пробы черносланцевой руды крупностью +2,5-1,6 мм (рисунок 3.10).

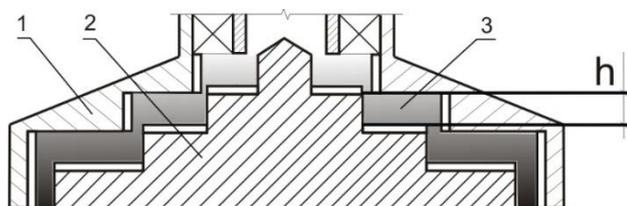


Рисунок 3.10 – Общий вид лабораторной ступенчатой мельницы

1- Верхний рабочий орган; 2 – Нижний рабочий орган; 3 – рабочая камера; h – регулируемый зазор рабочей камеры

Выход контрольного класса крупности -0,071 мм при разных значениях зазора, в диапазоне от 12 мм до 22 мм, представлен на рисунке 3.11.

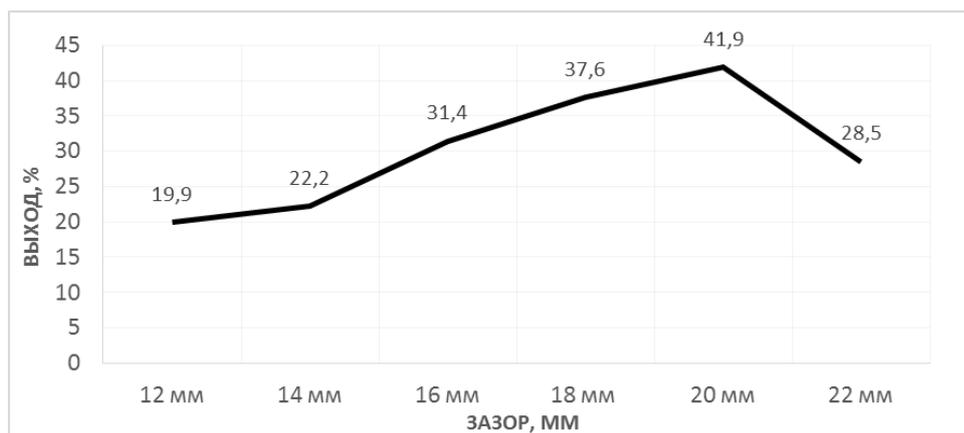


Рисунок 3.11 – Выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм при разном зазоре рабочей камеры ступенчатой мельницы

При каждом значении зазора экспериментальным путем определялись наиболее эффективные показатели измельчаемости проб в зависимости от скорости вращения верхнего рабочего органа при постоянной частоте вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин (наиболее рациональное рабочее значение для измельчителя).

В таблице 3.8 представлены значения скоростей воздушного потока при разных зазорах рабочей камеры и при разных значениях числа оборотов вращения верхнего рабочего органа. Число оборотов вращения верхнего рабочего органа определялось тахометром АТТ-6001, скорость вращения регулировалась изменением напряжения питания электродвигателя с помощью ЛАТРа.

Таблица 3.8 – Значения скоростей воздушного потока при разных зазорах

Зазор, мм	Скорость воздушного потока, м/с	Частота оборотов, об/мин
12	8,35	400
14	10,1	550
16	10,28	1400
18	9,49	2000
20	9,96	2550
22	10,38	2900

По результатам, приведенным на рисунке 3.11 видно, что наибольшее значение эффективности измельчения достигается при зазоре рабочей камеры до

20 мм, при этом, суммарные скорости формирующихся в рабочей полости воздушных потоков при всех испытанных значениях зазора близки к значению 10 м/с. При зазоре более 20 мм эффективность измельчения резко падает за счет того, что увеличивается рабочая камера измельчения (при конструктивных параметрах рабочих органов высоты и ширины ступеней), вследствие которого формирующие воздушные потоки оказывают наибольшее негативное воздействие, нивелируя динамические воздействия и вынося их из рабочей зоны измельчения недоизмельченные материалы.

Таким образом, экспериментальным путем были определены рациональные параметры рабочей камеры (зазоры между рабочими органами) лабораторной ступенчатой мельницы. При зазоре 20 мм образуются наиболее рациональные условия для циркулирования потоков измельчаемых частиц в зоне измельчения, с учетом формирующихся воздушных потоков. При этом не исключено, что для измельчения менее крепких и крупных геоматериалов, наиболее рациональное значение зазора между рабочими органами может меняться при тех или иных режимах работы мельницы (окружной скорости рабочих органов).

3.6 Экспериментальные исследования по интенсификации измельчения в опытной лабораторной центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного действия за счет установки дополнительных отбойных элементов

Цель проведенных исследований заключается в модернизации ступенчатой мельницы за счет установки дополнительных отбойных ребер для повышения эффективности измельчения рудных материалов [107-109].

При измельчении в лабораторной ступенчатой мельнице использовались навески черносланцевой руды массой 150 г и крупностью -2,5+1,6 мм. Измельчение происходило в ступенчатой мельнице с установкой дополнительных съемных отбойных элементов разной конфигурации. Регулируемыми параметрами при работе на ступенчатой мельнице являются: частота оборотов рабочих органов

мельницы, время пропускa измельчаемой пробы, масса проб и сменные дополнительные отбойные ребра разной конфигурации.

На первоначальном этапе исследования, черносланцевые пробы в количестве 7 штук с исходной крупностью $-2,5+1,6$ мм и массой по 150 г подвергались измельчению в лабораторной ступенчатой мельнице без отбойных элементов (рисунок 3.12). Время пропускa каждой пробы составляло 30 секунд, при частоте оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа 2000 об/мин.



Рисунок 3.12 – Рабочий орган ступенчатой мельницы без дополнительных отбойных ребер

Исследования на лабораторной мельнице с установкой дополнительных съемных ребер двух вариантов проводились аналогичным образом. Общий вид рабочих органов мельницы с дополнительными отбойными элементами двух вариантов, представлены на рисунке 3.13. Вариант №1 выполнен в виде отбойного ребра длиной на полступени рабочего органа мельницы, вариант №2 – в виде отбойного ребра на всю длину ступени рабочего органа.

Полученные усредненные данные результатов измельчения представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Сравнительные результаты продуктов измельчения

Классы крупности, мм	Без отбойных элементов, %	С отбойными элементами, % Вариант №1	С отбойными элементами, % Вариант №2
-2,5+1,6	7,58	4,09	0
-1,6+1	4,9	5,02	0
-1+0,63	4,2	6,31	5,31
-0,63+0,315	19,58	12,56	7,21
-0,315+0,16	5,04	3,67	4,51
-0,16+0,1	13,01	15,48	14,85
-0,1+0,071	8,09	9,32	15,85
-0,071+0,0	37,6	43,55	52,27



а)

б)

Рисунок 3.13 – Рабочие органы ступенчатой мельницы с дополнительными отбойными элементами: а) Вариант №1 б) Вариант №2

Полученные сравнительные результаты измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице с отбойными элементами и без них, представлены на рисунке 3.14.

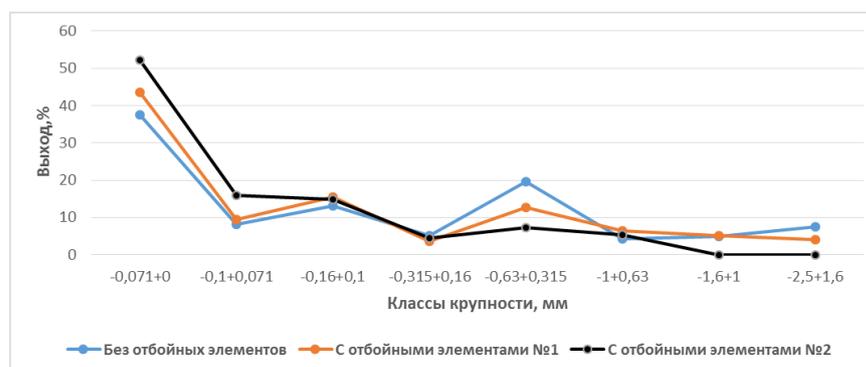


Рисунок 3.14 – Сравнительные результаты измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице

Как видно из рисунка 3.14, при измельчении в мельнице с дополнительными отбойными элементами варианта №2 по сравнению с другими вариантами происходит сокращение выхода класса крупности $-0,63+0,315$ мм с переходом его в более мелкие классы крупности, за счет чего повышается степень измельчения до 2,7 раз. Повышение эффективности измельчения в мельнице с отбойными элементами №2 происходит за счет того, что при такой форме отбойных элементов разрушаемые частицы испытывают дополнительные ударные нагрузки.

3.7 Экспериментальные исследования по определению рационального количества отбойных элементов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице многократного ударного воздействия

При экспериментальных исследованиях в лабораторной ступенчатой мельнице использовалась черносланцевая руда крупностью $-2,5+1,6$ мм. Измельчение происходило в ступенчатой мельнице без дополнительных отбойных элементов и с разным количеством в двух вариантах, представленных на рисунке 3.15. Вариант №1 с 4 отбойными элементами на каждой ступени активатора и вариант №2 с 8 отбойными элементами на каждой ступени активатора.

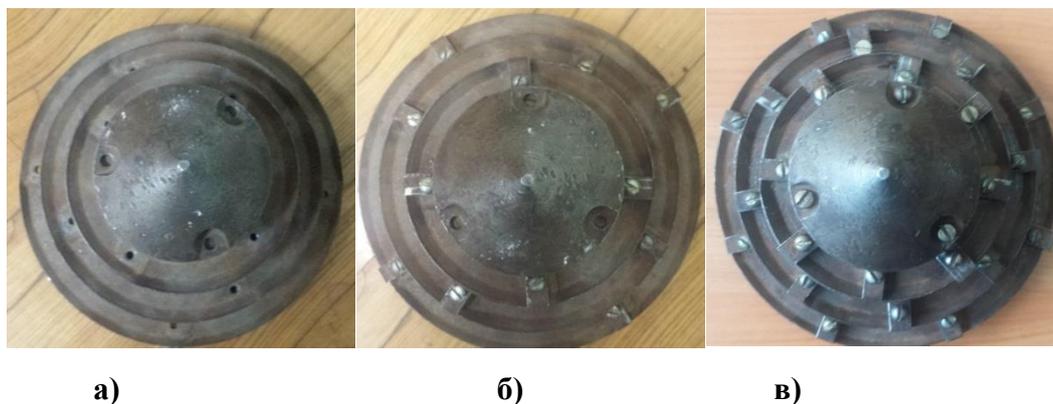


Рисунок 3.15 – Рабочие органы ступенчатой мельницы с дополнительными отбойными элементами: а) Вариант без отбойных элементов б) Вариант №1 в) Вариант №2

На рисунке 3.16 представлены сравнительные результаты измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице с разными вариантами отбойных элементов.

По результатам измельчения видно, что при измельчении с отбойными элементами №2 по сравнению с другими вариантами в продуктах измельчения практически отсутствуют классы крупности крупнее 0,315 мм, с их переходом в более мелкие классы крупности, за счет чего повышается степень измельчения до 4 раз.

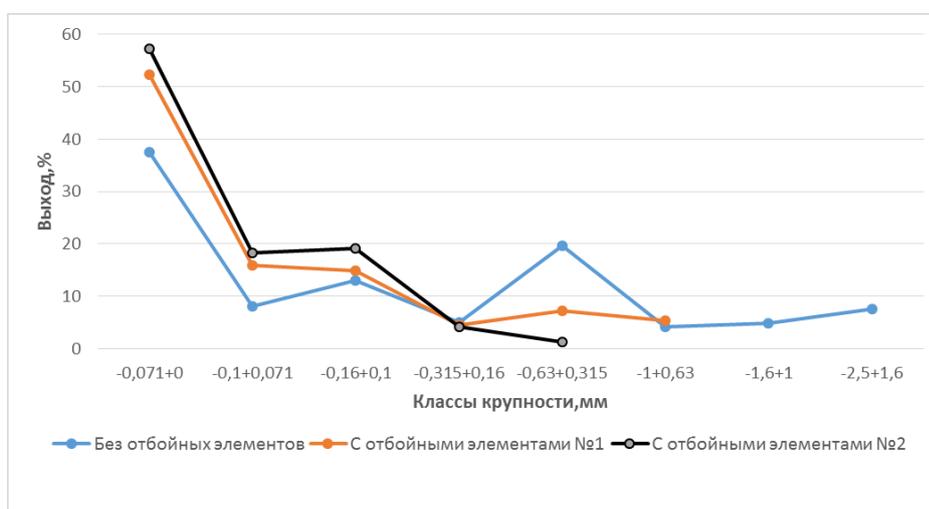


Рисунок 3.16 – Сравнительные результаты измельчения в ступенчатой мельнице

Таким образом, установлено, что при дезинтеграции рудных материалов в лабораторной ступенчатой мельнице за счет установки 8 дополнительных отбойных элементов на каждой ступени активатора происходит повышение степени измельчения за счет вторичных ударных нагрузок на частицы, которые отскакивают от отражательной поверхности наружного вращающегося рабочего органа.

Эксперименты с дополнительными отбойными элементами на активаторе центробежной ступенчатой мельницы показали, что существует довольно интенсивное образование противонаправленных потоков в рабочей зоне измельчителя и что установка отбойных элементов на активаторе существенно

повышает степень измельчения. Полученные результаты позволяют повысить эффективность работы ступенчатой центробежной мельницы.

Создание рациональных условий интенсификации процесса столкновения частиц с рабочим ступенчатым органом с отбойными элементами в центробежной мельнице позволяют повысить эффективность измельчения.

ВЫВОДЫ

Анализ материала, представленного в третьей главе, позволяет сделать следующие выводы:

1. В настоящее время проведено множество исследований и разработан целый ряд методов испытаний по разрушению рудных материалов однократными и многократными динамическими воздействиями. Однако, применительно к разрушению «свободным ударом», метод определения предела прочности горных пород при динамической нагрузке недостаточно разработан. Продолжает оставаться неизученным в количественном и в качественном отношении, влияние различных конструктивных и режимных факторов на выход фракций различной крупности при измельчении свободным ударом разнообразных по своим свойствам горных пород.
2. Основными недостатками существующих методик по разрушению образцов рудного материала является то, что они сводятся к анализу гранулометрического состава разрушенного материала, без учета физико-механических свойств разрушаемых горных пород, что затрудняет реальную оценку измельчаемости или дробимости единичного куска материала, определённой крупности и разных механических свойств.
3. На основе проведенных экспериментальных исследований дезинтеграции рудных частиц установлены зависимость разрушения частиц разной крепости и крупности от скорости столкновения, а также критические скорости разрушения частиц разной крупности и крепости по шкале Протодяконова.

4. Разработана методика расчета необходимой критической скорости столкновения для разрушения частиц крупностью от 1 до 10 мм разной крепости по шкале Протодьяконова с использованием разработанного центробежного лабораторного стенда.
5. Разработан модуль расчета в программе Microsoft Excel для определения необходимой критической скорости столкновения для разрушения частиц крупностью от 1 до 10 мм разной крепости по шкале Протодьяконова.
6. Определено влияние числа ступеней и окружной скорости на эффективность измельчения в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице.
7. На примере трехступенчатой мельницы разработана математическая модель и методика расчета конечной скорости взаимодействия частицы с рабочим органом и друг с другом в зависимости от заданной окружной скорости и геометрических параметров рабочих органов.
8. Экспериментально установлена зависимость эффективности измельчения рудных материалов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице от скорости воздушного потока в рабочей камере при разных окружных скоростях вращения рабочих органов мельницы.
9. Экспериментально установлено наличие рациональных режимных параметров, заданных конструктивной особенностью лабораторной центробежной мельницы со ступенчатыми рабочими органами (высотой и шириной рабочих ступеней), с учетом формирующихся воздушных потоков при различных значениях зазора между рабочими органами мельницы.
10. Создание рациональных условий интенсификации процесса столкновения частиц с рабочим ступенчатым органом за счет установки рационального количества отбойных элементов в центробежной мельнице позволяют повысить эффективность измельчения.

4 Результаты экспериментальных работ на опытно-промышленном образце центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800

4.1 Разработка и создание полупромышленного образца центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800

В области тонкого измельчения предложена центробежная мельница встречного удара ЦМВУ-800, общий вид мельницы приведен на рисунке 4.1.

Центробежная мельница ЦМВУ-800, реализующая способ ударного дробления [110], является опытно-промышленным вариантом установки, описание конструкции и принцип работы которой описаны в главе 2 раздел 2.1.1, состоит из противоположно вращающихся роторов трехступенчатой формы [111].



Рисунок 4.1 - Центробежная мельница встречного удара (ЦМВУ-800)

Расчётные величины относительных скоростей взаимодействия измельчаемого материала по ступеням мельницы при рабочих числах оборотов вращения верхнего и нижнего роторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Линейные скорости, сообщаемые разрушаемому материалу

Количество оборотов, об/мин	1 ступень	2 ступень	3 ступень
Верхний рабочий орган 2000 Нижний рабочий орган 5000	51,039 м/с	62,821 м/с	78,397 м/с
Верхний рабочий орган 1000 Нижний рабочий орган 5000	43,728 м/с	53,846 м/с	67,197 м/с
Верхний рабочий орган 500 Нижний рабочий орган 5000	40,071 м/с	49,358 м/с	61,567 м/с

Техническим заданием на проектирование мельницы были поставлены следующие требования:

- противоположное вращение рабочих органов-роторов;
- диаметр нижнего ротора 770 мм;
- не менее трех ступеней измельчения;
- угловые скорости вращения роторов не менее:
верхнего – 140 с^{-1} , нижнего – 20 с^{-1} ;
- возможность быстрой замены быстроизнашивающихся деталей;
- минимально возможные габаритные размеры и масса;
- транспортабельность и мобильность конструкции.

Обеспечение противоположного вращения роторов было достигнуто путем установки двух отдельных электродвигателей.

Из конструктивных соображений и по необходимой мощности привода выбрано два электродвигателя с $N=7,5 \text{ кВт}$ с общей мощностью $N_c=7,5 \cdot 2=15 \text{ кВт}$.

Опытно-промышленный вариант ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 в составе модульной передвижной рудоподготовительной установки (МПРОУ) был испытан при крупнообъемном опробовании месторождений Одолго и Задержнинское [112-115]. МПРОУ является авторской разработкой лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН и создана для освоения мелких рудных месторождений и рудопроявлений [116-125]. В своём составе МПРОУ имеет дробильное, измельчительное и пневмосепарационное оборудование сухого действия, среди которого была задействована мельница ЦМВУ-800 [126-129].

Конструктивно вся установка смонтирована на раме и состоит из следующих узлов и деталей (рисунок 4.2):

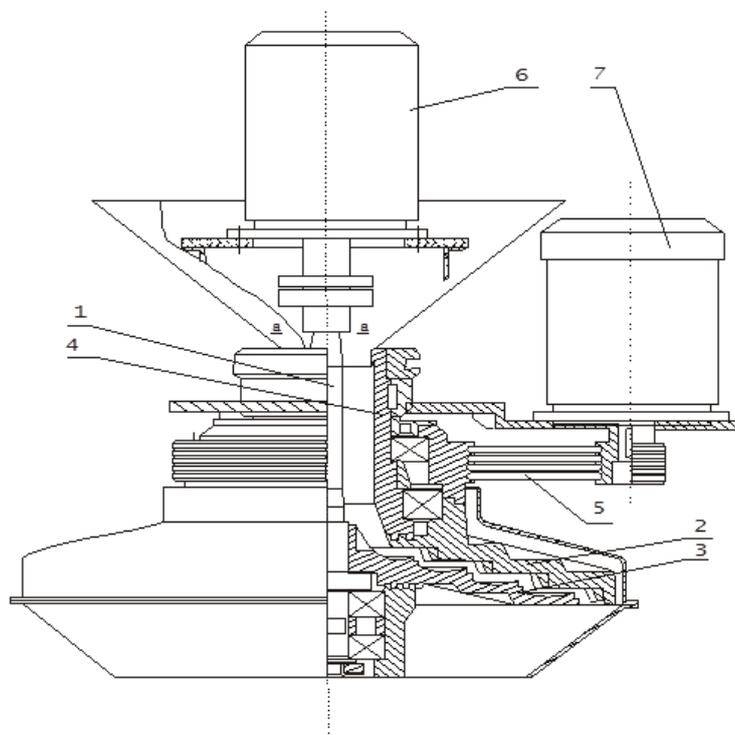


Рисунок 4.2 – Конструкция центробежной ступенчатой мельницы:

1 – вал в сборе; 2 - ротор верхний; 3 - ротор нижний; 4 - втулка несущая; 5 - передача клиноременная; 6 - электродвигатель верхнего ротора, N=3,5 кВт;
7 - электродвигатель нижнего ротора, N= 3,5 кВт

Техническая характеристика измельчителя приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Техническая характеристика ЦМВУ-800

№	Параметры	Показатели
1	Производительность, кг/ч	до 6
2	Крупность исходного питания, мм	до 15
3	Диаметр рабочих органов: верхнего, мм нижнего, мм	790 770
4	Степень измельчения	до 30
5	Мощность двигателей, кВт	7
6	Масса измельчителя, кг	900

Технологическая схема рудоподготовки, с применением ЦМВУ-800 показана на рисунке 4.3.

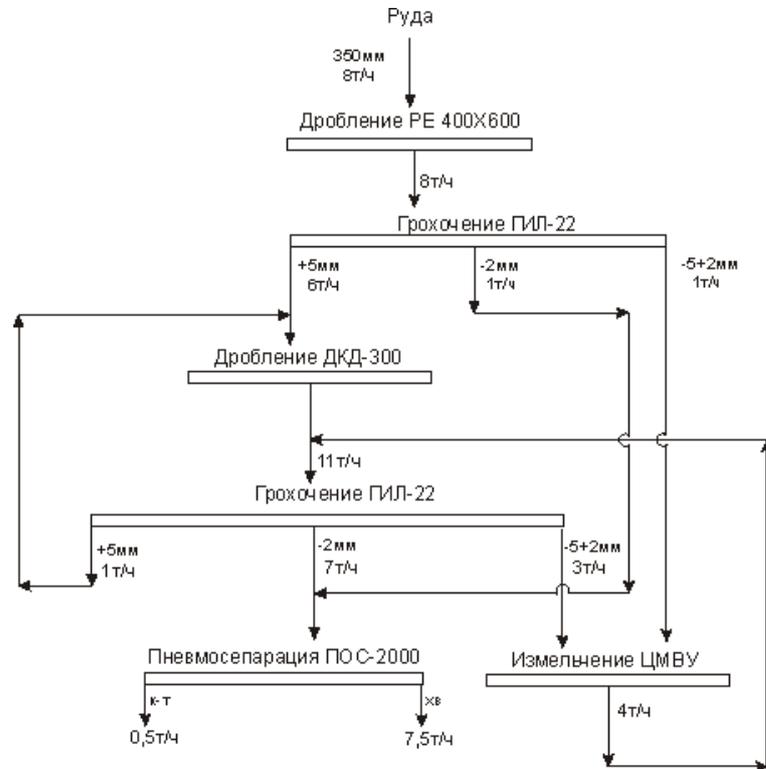


Рисунок 4.3 - Технологическая схема рудоподготовки с применением ЦМВУ-800

На рисунке 4.4 показан вариант с размещением ЦМВУ-800 в составе МПРОУ на шасси автомобиля КамАЗ.

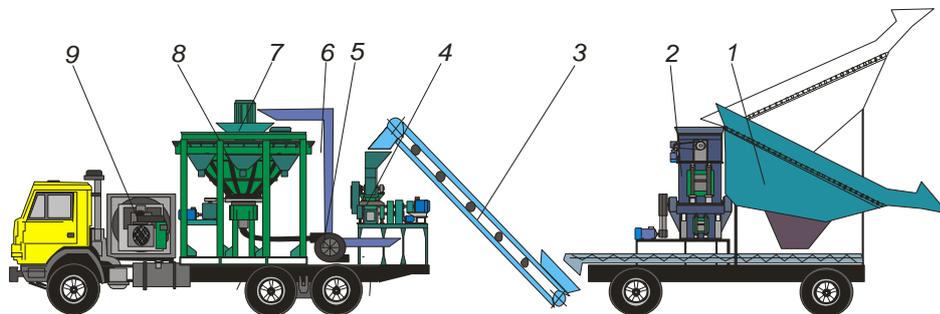


Рисунок 4.4 – Вариант размещения ЦМВУ-800 на шасси автомобиля КамАЗ

- 1- Грохот; 2- Инерционная дробилка; 3-Транспортер; 4- Дробилка ДКД-300; 5 - Вентилятор; 6- Перегрузатель; 7 - Ступенчатая мельница ЦМВУ-800; 9 - Пневмосепаратор ПОС-2000; 10 - Дизель генератор 100 кВт.

4.1.1 Методика экспериментальных исследований на опытно-промышленном образце центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800

Центробежная мельница многократного ударного действия ЦМВУ-800 была разработана на основе лабораторной модели ступенчатой мельницы.

По результатам ранее проведенных экспериментальных работ был принят, как наиболее эффективный трехступенчатый вариант противоположно вращающихся рабочих органов, с возможностью регулировки зазора от 10 до 30 мм. Верхний ступенчатый рабочий орган имеет зубчатые отражательные элементы, а нижний рабочий орган имеет на каждой ступени отбойные ребра.

Диаметры ступеней нижнего рабочего органа составили: 440 мм; 600 мм; 770 мм, а верхнего рабочего органа: 460 мм; 620 мм; 790 мм. Обеспечение противоположного вращения роторов было достигнуто путем установки двух отдельных электродвигателей.

Применяемое оборудование:

1. Опытно - полупромышленный образец ступенчатой мельницы ЦМВУ-800;
2. Питатель;
3. Ленточный конвейер;
4. Аналитические весы;
5. Ситовой анализатор;
6. Сита с размерами ячеек: -10+7 мм; -7+5 мм; -5+2,5 мм; -2,5+1,6 мм; -1+0,63 мм; -0,63+0,315 мм; -0,315+0,16 мм; -0,16+0,1 мм; -0,1+ 0,063 мм; -0,063 мм.

При исследовании процессов измельчения в ЦМВУ-800 оценивается степень измельчения рудных материалов при различных рабочих режимах установки. Оценка производится определением гранулометрического состава исходной руды и продуктов измельчения, при исходных заданных конструктивных и режимных параметров работы мельницы.

Изменяемые режимные параметры работы мельницы:

- Исходная загрузка мельницы (производительность);
- Крупность исходного рудного материала.

Исследования проводятся с кварцевой рудой исходной крупностью -10+5 мм, -5 мм. При диапазоне производительности мельницы от 1 до 7 т/ч.

Порядок проведения экспериментов:

1. Приготовить исходный рудный материал заданной крупности.
2. Подать исходный рудный материал в приемный бункер мельницы с заданной производительностью питателя.
3. Из продуктов измельчения методом квартования отобрать пробу для гранулометрического анализа.

Проба подвергается ситовому анализу по классам крупности: -10 +7 мм; -7+5 мм; -5+2,5 мм; -2,5+1,6 мм; -1+0,63 мм; -0,63+0,315 мм; -0,315+0,16 мм; -0,16+0,1 мм; -0,1+ 0,063 мм; -0,063 мм.

Данные гранулометрического состава переводятся в процентах и заносятся в таблицу 4.3.

По выходу контрольного класса крупности определяется эффективность измельчения испытуемого рудного материала и устанавливается зависимость от исходной загрузки мельницы.

Таблица 4.3 – Гранулометрический состав пробы

Классы крупности, мм	Выход, %	
	Исходная руда	Продукты измельчения

Также по отдельным методикам проводятся исследования о возможности работы ЦМВУ-800, при отрицательных температурах, по определению влияния льдистости и влажности исходных рудных материалов на эффективность измельчения, по изучению изомеризации частиц золота в продуктах измельчения золотосодержащих руд.

4.1.2 Результаты испытания центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 на месторождении Одолго

Основной проблемой при обработке руд месторождения Одолго является высокое содержание магнитных материалов (магнетита), что затрудняет эффективное использование традиционных методов обработки проб, таких как промывка на лотках и шлюзах. Промывка на шлюзе приводит к быстрому засорению пространства между рифелями титаномагнетитом [130]. В связи с этой проблемой было принято решение о проведении масштабных испытаний с применением нового оборудования МПРОУ на стадии рудоподготовки. Это оборудование включает дробилку ДКД-300 для дробления и центробежную мельницу ЦМВУ-800 для измельчения, а также использование пневматической сепарации на ПОС-2000 для тонкого измельченного материала [131]. Схема расположения рудоподготовительного оборудования с использованием ЦМВУ-800 с учётом рельефа местности представлена на рисунке 4.5.

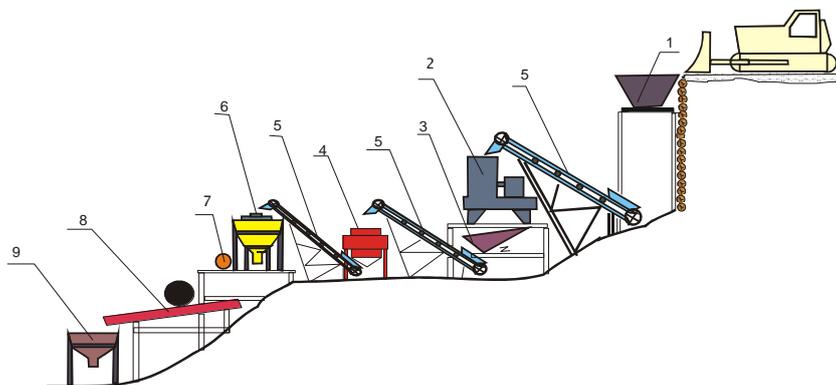


Рисунок 4.5 – Схема расположения рудоподготовительного оборудования с использованием ЦМВУ-800, при крупнообъемном опробовании месторождения Одолго:

1 – Бункер питатель; 2 - Дробилка ДКД-300; 3 – Грохот; 4 – Мельница ЦМВУ-800; 5 – Конвейерные перегружатели; 6 – Пневмосепаратор ПОС-2000; 7 - Вентилятор; 8 – Магнитный шлюз; 9 – Ротационный центробежный сепаратор

Основное оборудование связано между собой конвейерными перегружателями, а исходная руда подавалась бульдозерами на питающий бункер-питатель. Мельница работала на продуктах дробления дробилки ДКД-300 напрямую подаваемых при помощи конвейерного перегружателя.



Рисунок 4.6 – Фрагмент работы ЦМВУ-800

Во время полевых испытаний на месторождении Одолго в составе МПРОУ центробежная мельница ЦМВУ-800 показала высокую эффективность измельчения, фрагмент испытания центробежного измельчителя представлен на рисунке 4.6.

Измельчению подвергались золотосодержащие руды кварц-жильного типа высокой степени трещиноватости, содержащие тонкие прожилки молочного кварца в мусковит-серицитовой слюдянистой массе. Балансовым расчетом было установлено, что потери в массе руды в виде тонкодисперсной пыли с частицами листовой слюды менее 20 микрон по крупности составляет до 20%.

Измельчению, в основном, подвергалась руда крупностью -15 мм после грохочения продуктов дробления ДКД-300, вместе с тем, в пробном порядке измельчению подвергался материал разных классов крупности.

Наиболее характерными оказались результаты измельчения рудных образцов

разных классов крупности -5 мм и -20+5 мм. Грансостав продуктов измельчения руды без учёта потерь материала с тонкодисперсным материалом приведён в таблице 4.4 и на рисунке 4.7 в виде распределения материала по классам крупности.

По гранулометрическим характеристикам видно, что наибольшая доля измельчённого материала приходится на класс крупности -0,63 +0,315 мм.

Таблица 4.4 - Грансостав продуктов измельчения кварцевой руды

Классы крупности, мм	Выход, %	
	Исх. круп. -5мм	Исх. круп. -20+5мм
-0,05+0,0	0,65	0,53
-0,1+0,05	4,37	1,48
-0,2+0,1	13,88	3,71
-0,315+0,2	20,76	7,41
-0,63+0,315	32,13	28,72
-1+0,63	11,80	23,20
-1,6+1	11,47	22,24
-2,5+1,6	4,48	10,06
-5+2,5	0,48	2,65

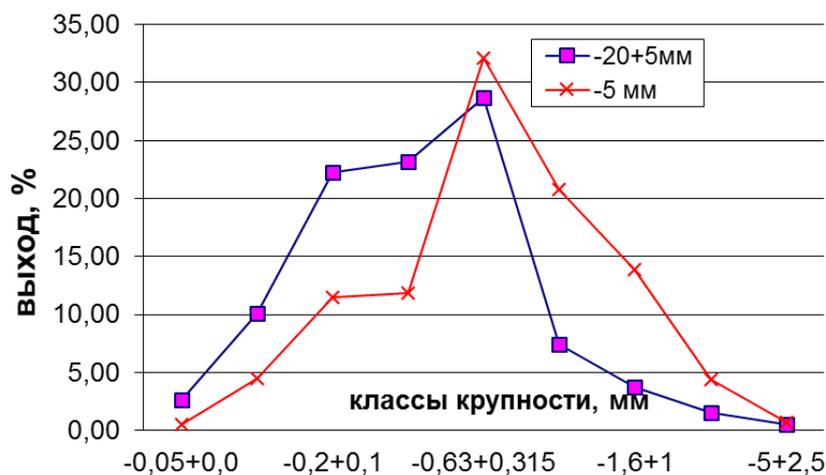


Рисунок 4.7 - Сравнительная гранулометрическая характеристика продуктов измельчения классов крупности -20+5 мм и -5 мм

Из полученных результатов видно, что эффективность измельчения рудной пробы классом крупности -20+5 мм выше, чем при измельчении пробы меньшим

классом крупности -5 мм. Степень измельчения по соотношению средневзвешенной суммарной крупности проб исходной и конечной измельчённой партии руды составляет: для класса крупности -5 мм – 7,7; для класса крупности – 20+5 – 13,2.

Высокая степень измельчения для более крупных классов объясняется тем, что при разрушении в виде свободного удара кусков о поверхность рабочих органов мельницы, разрушение частицы в основном зависит от массы самой частицы. Чем весомее частица, тем выше импульс, и соответственно, результат разрушения. Для реализации преимущественно ударного разрушения размер исходного питания для опытно-промышленного варианта центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 составляет 10-15 мм. С другой стороны, при превышении данного размера разрушение частиц начинает происходить не только за счет динамических ударных нагрузок и самоизмельчения, но и за счет истирания, что с позиций энергетических и силовых факторов, участвующих в процессе, повышает эффективность разрушения, но приводит к интенсивному износу рабочих органов. Поэтому укрупнённое питание, как в данном случае, применимо лишь для руд низкой крепости.

Таким образом, мельница способна функционировать в условиях укрупненного питания и успешно комбинировать два процесса: мелкое дробление и эффективное измельчение, если принять во внимание то, что традиционная граница процессов дробления и измельчения проходит по крупности 5 мм. В целом, мельница ЦМВУ-800 показала высокую эффективность работы при измельчении золотосодержащих руд месторождения Одолго, доли выхода класса крупности - 0,63 мм при измельчении руды исходной крупностью -5 мм составила 60,3%, а при измельчении руды крупностью -20+5мм – 86,8%.

В исследуемой окислённой руде наблюдалась высокая доля магнитных материалов, прежде всего, связанных с минералами железа и магнетита. Причем, они попадают в концентраты пневмосепарации и гравитационного обогащения вместе с золотом.

Проводились исследования по измельчению более механически прочных магнитных фракций, выделенных из концентратов операциями доводки на концентрационном столе [132]. Отобранные магнитные фракции были собраны, высушены и подвергались измельчению на центробежной мельнице ЦМВУ-800. Общий вес пробы составлял 25,500 кг. Проба представляет собой черный тяжелый материал, состоящий, в основном, из магнетита и титаномагнетита. Гранулометрический состав магнитной пробы представлен в таблице 4.4.

Как видно, по гранулометрическому составу данной пробы до и после измельчения на ЦМВУ-800 (таблица 4.5) степень измельчения составила 3,9, учитывая то, что измельчаемая проба состояла, в основном, из магнетита и титаномагнетита, относящихся к весьма крепким материалам и то, что более 35 % в пробе представлено классом крупности менее 1 мм, такая степень измельчения показывает высокую эффективность работы центробежной ступенчатой мельницы при измельчении весьма крепких руд с высокой долей содержания класса крупности -1 мм.

Таблица 4.5 – Гранулометрический состав магнитной пробы

Классы крупности, мм	До ЦМВУ, %	После ЦМВУ, %
+2,5	28,4	0,65
-2,5+1,6	17,6	4,37
-1,6+1	18,8	13,88
-1+0,63	15,25	20,76
-0,63+0,315	14,04	32,13
-0,315+0,2	3,25	11,80
-0,2+0,1	2,05	11,47
-0,1+0,05	0,46	4,48
-0,05+0,0	0,18	0,48
Степень измельчения	-	3,9

Также, в результате проведенных исследований и подробного анализа продуктов обработки крупнообъемного опробования месторождения Одолго наблюдается высокая степень деформации золотых частиц [133, 134]. При гранулометрическом анализе продуктов измельчения на центробежной мельнице

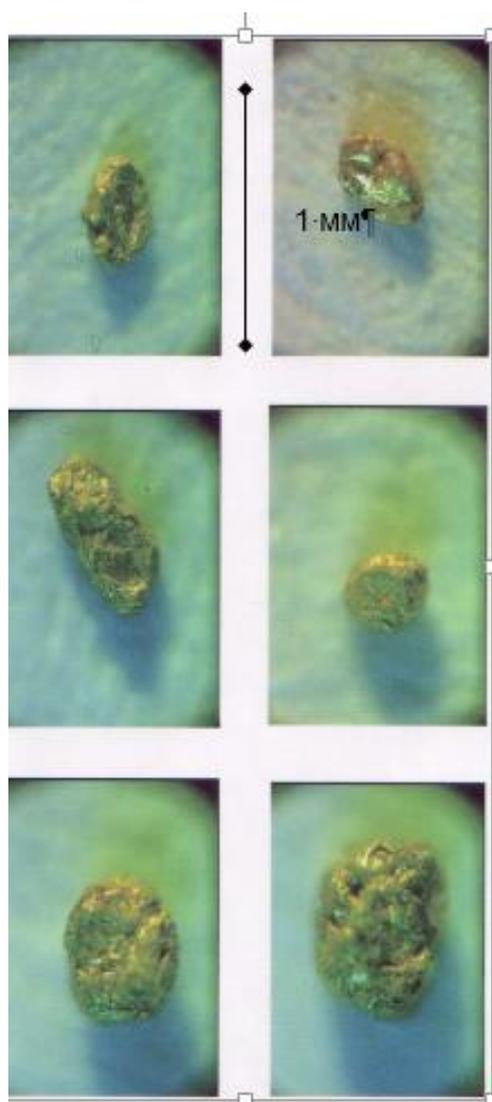


Рисунок 4.8 - Фотографии
обработанного золота

ЦМВУ-800 (в концентратах ПОС-2000) обнаружена приобретенная вследствие механических воздействий и характерных деформаций изометричная округлая форма частиц золота. Анализ показал, что частицы золота в процессе измельчения в центробежной мельнице ЦМВУ-800 не перетираются и не завальцовываются, а приобретают благодаря природной ковкости комковидную, а иногда и сфероидную форму частиц. Анализ отобранных частиц золота выявил, что самые большие фракции золота (размером более 0,25 мм) имеют округлую форму. Более того, некоторые из них напоминали золотые дробинки, на которых практически полностью отсутствуют сростки с вмещающими породами, плотных сфероидов (рисунок

4.8).

Данный процесс, наблюдаемый по разным исследованиям [135-137], иногда понимается как процесс изометризации частиц золота при измельчении материалов свободным ударом.

Изометризация частиц золота, как обладающих определённой ковкостью, происходит в результате многочисленных динамических ударных нагрузок и взаимодействия с поверхностями рабочих органов.

В общем, следует отметить, что деформация золотых частиц происходит без существенной потери массы, а новая изометрическая округлая форма увеличивает

их гидравлическую крупность. Это улучшает извлечение золота, особенно при гравитационном обогащении.

В целом, эффективность измельчения в центробежной мельнице, когда рассматривается выход мелких фракций, сравнима с результатами измельчения руды в шаровой мельнице [138, 139]. Здесь не учитывается циркулирующая нагрузка на шаровую мельницу, которая обычно составляет не менее 100%.

При этом энергопотребление центробежной мельницы значительно ниже, чем у шаровых мельниц, примерно на порядок, и по удельному весу аппарата (металлоемкости на единицу производительности) на два порядка меньше.

Следует отметить, что ступенчатая мельница обладает дополнительным преимуществом – низкой степенью переизмельчения материала по сравнению с шаровой мельницей. Это достигается при условии соблюдения рациональной исходной крупности питания ступенчатой мельницы. При работе мельницы были отмечены небольшие конструктивные недостатки в узле загрузки исходного материала и герметичности нижнего защитного кожуха. Учитывая эти недостатки в конструктивную документацию мельницы были введены необходимые изменения и дополнения, которые согласованы с заводом изготовителем, особое внимание было уделено износостойкости рабочих органов.

В перспективе, в целом, сухое центробежное измельчение материалов составит конкуренцию с традиционными процессами шарового измельчения.

Натурные испытания подтверждены актом (приложение 9) «Результаты опытно-промышленных испытаний мобильной рудообогатительной установки (МПРОУ) при поисково-разведочных работах и отработке месторождения Одолго, подтверждающим возможность применения сухой технологии рудоподготовки и переработки золотосодержащих руд с использованием центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.

4.1.3 Результаты испытаний центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ - 800 на месторождении Задержнинское

Целью испытаний являлось определение технической и технологической надежности опытно-промышленной центробежной мельницы ЦМВУ-800 в составе мобильной передвижной рудообогатительной установки (МПРОУ) в технологической схеме рудоподготовки золотосодержащей руды в условиях непрерывной работы.

Работы проводились на месторождении Задержнинское, расположенного на территории Усть-Майского улуса Республики Саха (Якутия), в 120 км юго-восточнее п. Звездочка. Измельчению подвергались руды высокой крепости кварц-жильного типа месторождения Задержнинское.

Испытание центробежной мельницы ЦМВУ-800 в составе оборудования МПРОУ проводилось в варианте комплексного их использования, как непрерывно действующая установка по обработке золотосодержащей руды. Схема цепи аппаратов с применением ЦМВУ-800 представлена на рисунке 4.9, общий вид цепи рудоподготовительных аппаратов на рисунке 4.10.

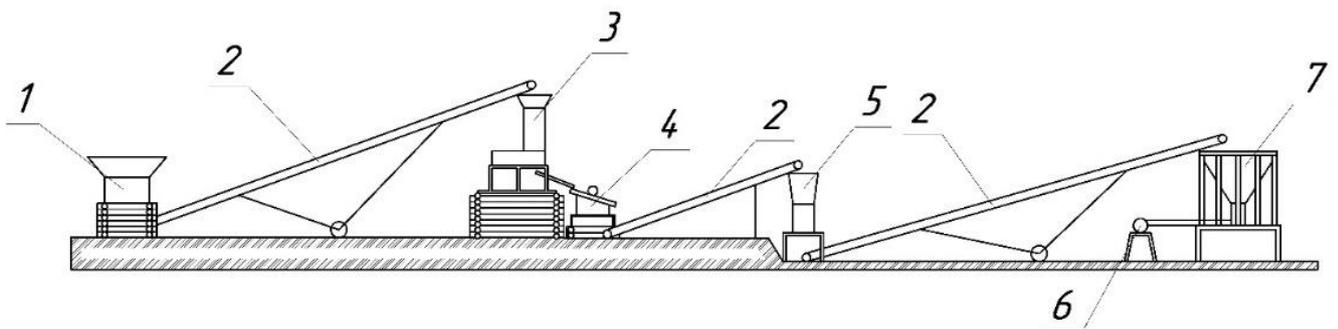


Рисунок 4.9 - Схема цепи аппаратов с применением ЦМВУ-800:

- 1 – бункер-питатель; 2 – конвейер; 3 – дробилка ДКД-300; 4 – грохот ГВ-0,6; 5 – мельница ЦМВУ-800; 6 – вентилятор; 7 – пневмосепаратор ПОС-2000



Рисунок 4.10 - Общий вид работы рудоподготовительной схемы цепи аппаратов с применением ЦМВУ-800

Рудная часть месторождения Задержнинское представлена жильным кварцем с примесью карбонизированных спессартитов и песчано-глинистых сланцев. Руда малосульфидная, присутствуют арсенопирит, пирит, сфалерит, массовая доля которых мала и не превышает 0,7 %. Золото в руде самородное, крупностью 0,005-1,5 мм, при этом 80% приходится на класс +0,15 мм. Анализом определено, что 97% золота находится в свободном виде. При измельчении до -0,2 мм в гравитационный концентрат извлекается 90 % золота. Пробность золота – 765.

В ходе проведенных исследований переработано 480 т рудной массы и получено концентрата – 11,7 т. В ЦМВУ-800 подавался продукт дробления на дробилке ДКД-300 после отсева класса крупности -10 мм (рисунок 4.11).

Работа мельницы сопровождалась выделением большого количества тонкодисперсной пыли, при работе в непрерывном режиме потери измельчаемого рудного материала в виде тонкодисперсной пыли крупностью менее 20 микрон составили до 16,8% от массы исходной руды. На месте был изготовлен пылеотводящий патрубок, который смог сократить потери тонкодисперсного измельченного материала до 12,1%, при этом надо учесть то, что пылеотводящий патрубок был установлен без принудительного отсоса.



Рисунок 4.11 – Центробежная мельница ЦМВУ-800 в работе

Подробные исследования по пылеобразованию и разработке рекомендаций по пылеподавлению при работе центробежной мельницы ЦМВУ-800 представлены в п. 4.2. Распределение измельченного материала по классам крупности без учета выделяемой тонкодисперсной пыли приведено в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Выход продуктов измельчения

Классы крупности, мм	Питание	
	Исходная крупность -5 мм	Исходная крупность -10 мм
-0,05+0,0	0,63	0,45
-0,05+0,1	4,37	0,48
-0,2+0,1	13,88	2,71
-0,315+0,2	20,76	7,41
-0,63+0,315	32,13	18,72
-1+0,63	11,80	20,20
-1,6+1	11,47	22,24
-2,5+1,6	4,48	18,06
-5+2,5	0,48	5,65
-10+5	-	4,08

Из таблицы 4.6 видно, что при загрузке на мельницу укрупненного питания - 10 мм наблюдается существенная разница во фракционном распределении материала: при подаче в мельницу материала -5 мм эффективность измельчения существенно выше по сравнению с огрублённым питанием. В этом случае, в

отличие от испытаний на месторождении Одолго во время ресурсных испытаний в режиме непрерывной работы произошел механический износ рабочих органов, преимущественно нижнего рабочего органа мельницы (активатора), в результате чего нарушился процесс ступенчатого измельчения (циркуляция потоков измельчаемой руды на уровне каждой ступени), вследствие чего стал происходить вынос центробежной силой наиболее крупных частиц из рабочей зоны измельчения. При этом частицы не получали достаточное количество столкновений, т.е. динамических воздействий.

Влияние износа рабочих органов прослеживается и по динамике изменения кумулятивных гранулометрических характеристик продуктов измельчения по объёму переработанной руды. На рисунке 4.12 приведены соответствующие кумулятивные гранулометрические характеристики продуктов измельчения в зависимости от объема переработанной руды (20 т, 40 т, 60 т) по мере износа рабочего органа, из которых видно, что чем больше количество переработанной рудной массы, тем меньше степень измельчения.

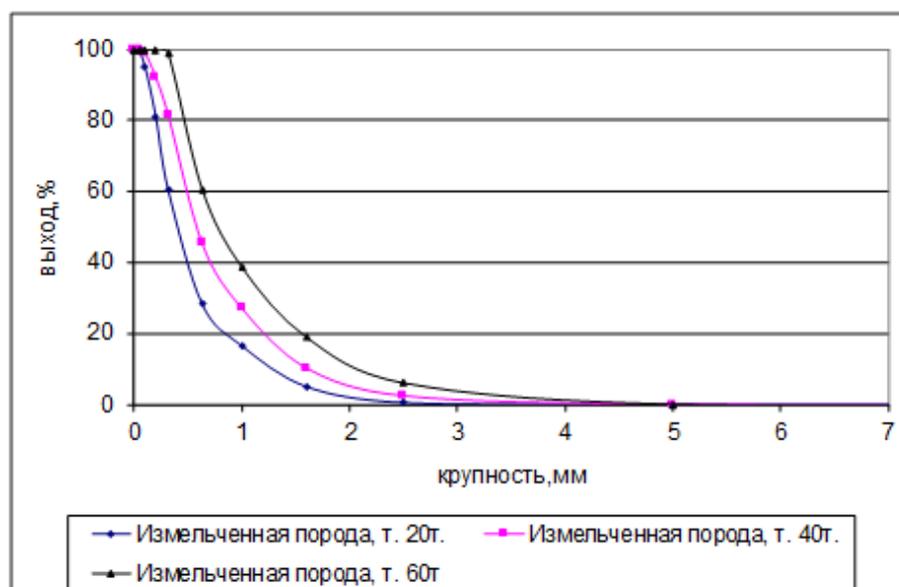


Рисунок 4.12 - Кумулятивные гранулометрические характеристики продуктов измельчения

После окончания полевых работ был произведен осмотр рабочих органов мельницы. Разборка и осмотр мельницы показали, что произошел износ всех трех рабочих поверхностей (ступенек) нижнего диска. Износ по телу ступенек в среднем составил около 5 мм по диаметру и по высоте – 3 мм. Отражательные зубчатые кольца верхнего диска подверглись износу в меньшей степени. Острые кромки и углы зубьев отражательных колец закруглились, потеря высоты зубьев – не более 1,5 мм (рисунки 4.13 и 4.14).

Высокая степень износа была связана тем, что нижний диск был отлит из стали марки 35Л без футеровки рабочих поверхностей износостойким материалом. Другой, немаловажной причиной стала загрузка в мельницу частиц размером более 10 мм, которая изменила физический характер процесса дезинтеграции в мельнице, т.е. кроме ударного разрушения стали присутствовать и истирательные нагрузки, которые привели к износу ступенек нижнего диска, не защищенных футеровкой.

Меньший износ отражательных колец объясняется тем, что они изготовлены из качественной стали, и их зубья термообработаны до HRC 60...65.



Рисунок 4.13 - Нижний рабочий орган мельницы

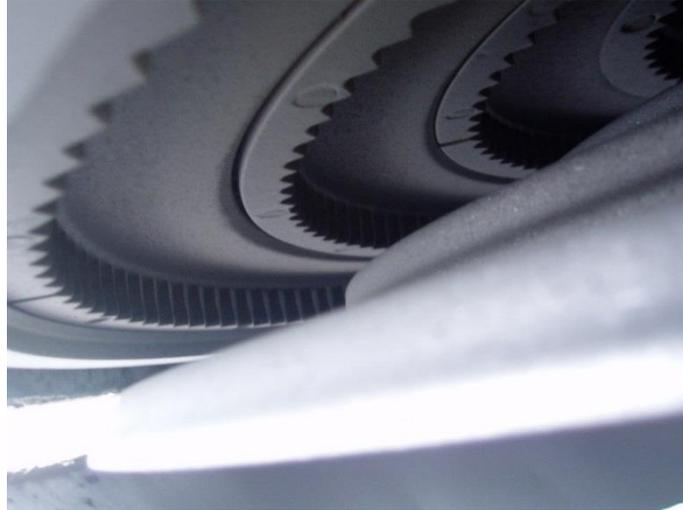


Рисунок 4.14 - Верхний рабочий орган мельницы

Для решения проблемы износа и, в целом, надёжности работы мельницы, конструкция скорректирована и в настоящее время нижние рабочие органы мельницы снабжаются заводом изготовителем съёмными износостойкими накладками из сплава 110Г13Л-1 (рисунок 4.15)

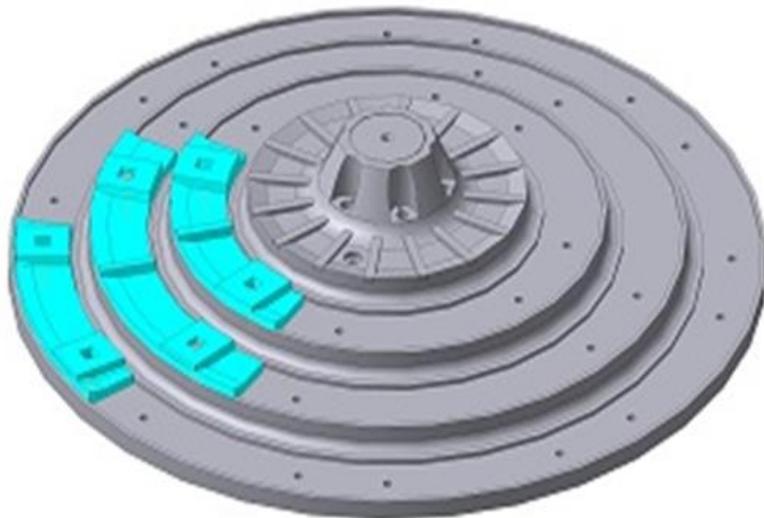


Рисунок 4.15 - Нижний рабочий орган со съёмными износостойкими накладками

Как показали испытания мельницы ЦМВУ-800, кроме износа нижнего рабочего органа других недостатков обнаружено не было. К незначительным

недостаткам можно отнести рекомендацию по увеличению диаметра загрузочного отверстия мельницы, из-за налипания измельчаемого материала на стенки загрузочной воронки при работе с рудными материалами повышенной влажности. Поэтому модернизация коснулась именно этих узлов аппарата.

Для увеличения диаметра загрузочного отверстия, так как верхнее расположение электродвигателя не оставляет достаточного пространства для увеличения приемной воронки, отказались от существующей схемы компоновки узлов и приняли нижнее расположение электродвигателя, который через клиноременную передачу передает вращение на вал нижнего диска. Такое решение позволяет увеличить диаметр загрузочного отверстия, уменьшает длину приводного вала и габарит аппарата по высоте, хотя требует принятия мер по защите приводных ремней и рабочих поверхностей (ручьев) шкивов от воздействия измельченного материала и увеличивает габариты аппарата по длине.

Для решения главной проблемы износа нижнего рабочего органа, для защиты его ступенек от износа нами была предложена установка на ступенях диска съемных накладок из сплава 110Г13Л-1. В результате этого изменились размеры ступенек диска по высоте, подшипниковый узел остался без изменений, за исключением крышки, куда установлена манжета для защиты подшипникового узла от проникновения пыли (рисунок 4.16). На ступеньках диска по периметру выполнены прямоугольные буртики для разгрузки болтов крепления накладок от срезающих усилий. Для предотвращения самоотвинчивания гайки застопорены шплинтами.

Регулировка рабочего зазора между верхним и нижним диском производится путем установки набора прокладок (толщина одной прокладки 0,5 мм) необходимой толщины между кронштейнами нижней и лапами верхней рам. По мере износа накладок (контролируется по количественному увеличению выхода крупных фракций) толщина набора прокладок уменьшается на необходимую величину.

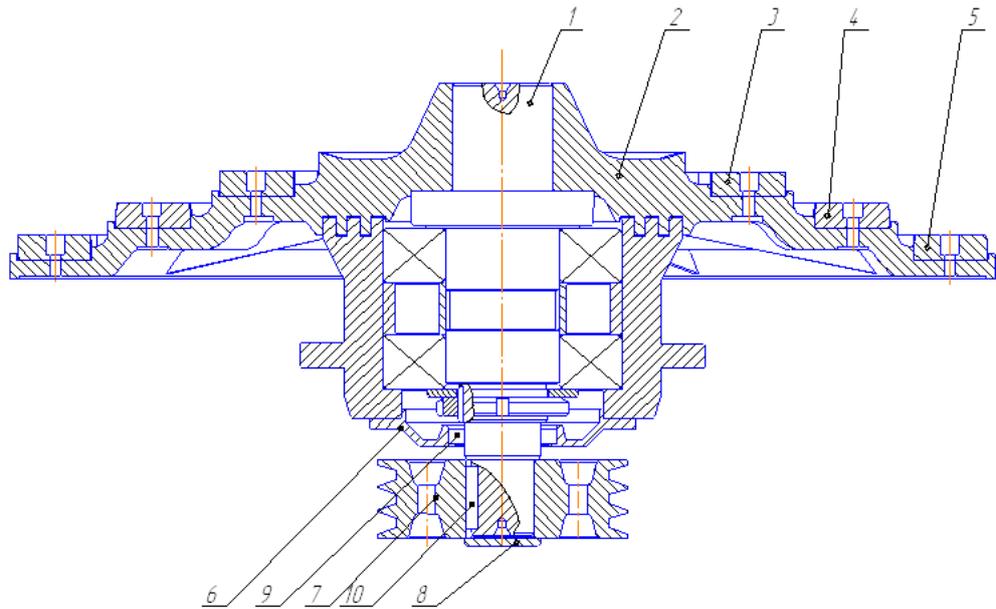


Рисунок 4.16 - Диск нижний в сборе:

1 – вал; 2 – диск нижний; 3,4,5 – съемные накладки; 6 – крышка; 7– шкив; 8 – шайба стопорная; 9 – манжета; 10 – шпонка

Вал укорочен по длине заподлицо с торцом ступицы диска, нижняя часть вала удлинена для монтажа ведомого шкива клиноременной передачи. Расчеты показали, что для данной мощности достаточно трех клиновидных ремней сечения В. Нижняя установка двигателя вызвала изменение конструкции защитного кожуха аппарата, так как прохождение приводных ремней через зону разгрузки потребовало их тщательной изоляции от измельченного материала.

Кроме износа нижнего рабочего органа мельницы из-за его исполнения без износостойкой футеровки и рекомендаций по увеличению загрузочного отверстия, других недостатков при испытании опытно-промышленного варианта центробежной мельницы ЦМВУ-800 в составе мобильной передвижной рудообогатительной установки (МПРОУ) в технологической схеме обогащения золотосодержащей руды в условиях непрерывной работы не было выявлено.

Таким образом, в полевых условиях опытно-промышленные испытания центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 в составе рудообогатительной установки МПРОУ, изготовленного на ОАО «ПО Усольмаш», подтверждают технологическую эффективность способа разрушения многократными ударными

воздействиями, заложенными в принцип работы нового оборудования при условии соблюдения требований по крупности исходного измельчаемого материала и усиления рабочих органов накладными износостойкими материалами.

4.2 Исследования пылеобразования и разработка рекомендаций по пылеподавлению при работе центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800

В процессе испытания центробежной мельницы ЦМВУ-800 с проектной производительностью 6 т/ч в составе рудообогатительной установки МПРОУ на ряде золоторудных объектов был установлен большой выброс пыли при работе в открытом режиме работы. В связи с этим были проведены специальные исследования по изучению процесса пылеобразования и разработке рекомендаций по пылеподавлению [140].

Основные исследованные параметры: определение концентрации запыленности вблизи работающей мельницы и сравнительный анализ грансостава измельченного рудного материала при разной производительности мельницы.

Для вывода образующихся при измельчении пылевидных фракций к мельнице ЦМВУ-800 через патрубок был подсоединен вентилятор ВД с пылеулавливающим циклоном. Исследования по изучению процесса пылеобразования проводились при работе центробежной мельницы в открытом и закрытом режимах работ. Под работой мельницы в открытом режиме подразумевается работа ЦМВУ-800 в первичном исполнении с одним защитным кожухом, а под работой в закрытом режиме работы подразумевается работа мельницы с установленным дополнительным защитным кожухом, что позволило значительно сократить выброс пыли.

Определение концентрации пыли производилось пробоотборником АПП 3/4, пробы отбирались непосредственно при работе центробежной мельницы с разной производительностью (рисунок 4.17).



Рисунок 4.17 - Выброс тонкодисперсной пыли при работе мельницы ЦМВУ-800 в открытом режиме

Исходным материалом служила черносланцевая руда классом крупности -10 +2,5 мм, пробы отбирались непосредственно на пылевыводящем патрубке.

Проведенными экспериментальными исследованиями по определению концентрации пыли на мельнице ЦМВУ-800 в закрытом режиме работы с пылевыводящим вентилятором ВД были получены следующие результаты (табл. 4.7).

Таблица 4.7 – Концентрация пыли при разной производительности ЦМВУ-800

№	Производительность мельницы, т/ч				
	2 т/ч	3 т/ч	4 т/ч	5 т/ч	6 т/ч
1	46,8 мг/куб. м	54,1 мг/куб.м	75,2 мг/куб.м	55,7 мг/куб. м	38,3 мг/куб.м
2	43,9 мг/куб. м	55,9 мг/куб.м	73,5 мг/куб.м	54,6 мг/куб. м	40,7 мг/куб.м
3	45,1 мг/куб. м	58,2 мг/куб.м	72,3 мг/куб.м	51,8 мг/куб. м	36,9 мг/куб.м
4	44,3 мг/куб. м	57,4 мг/куб.м	73,9 мг/куб.м	52,9 мг/куб. м	38,1 мг/куб.м
5	44,9 мг/куб. м	56,8 мг/куб.м	74,8 мг/куб.м	53,8 мг/куб. м	38,9 мг/куб.м
6	45,7 мг/куб. м	59,1 мг/куб.м	76,2 мг/куб.м	53,2 мг/куб. м	39,5 мг/куб.м
7	46,9 мг/куб.м	55,8 мг/куб.м	75,3 мг/куб.м	56,1 мг/куб. м	37,6 мг/куб.м
8	42,9 мг/куб.м	53,5 мг/куб.м	72,9 мг/куб.м	54,1 мг/куб. м	36,9 мг/куб.м

Как видно по результатам таблицы 4.7, выделение и наибольшая концентрация тонкодисперсной пыли происходит при работе центробежной мельницы с производительностью 3-4 т/ч, что подтверждается и гранулометрическим составом измельченных проб (рисунок 4.18).

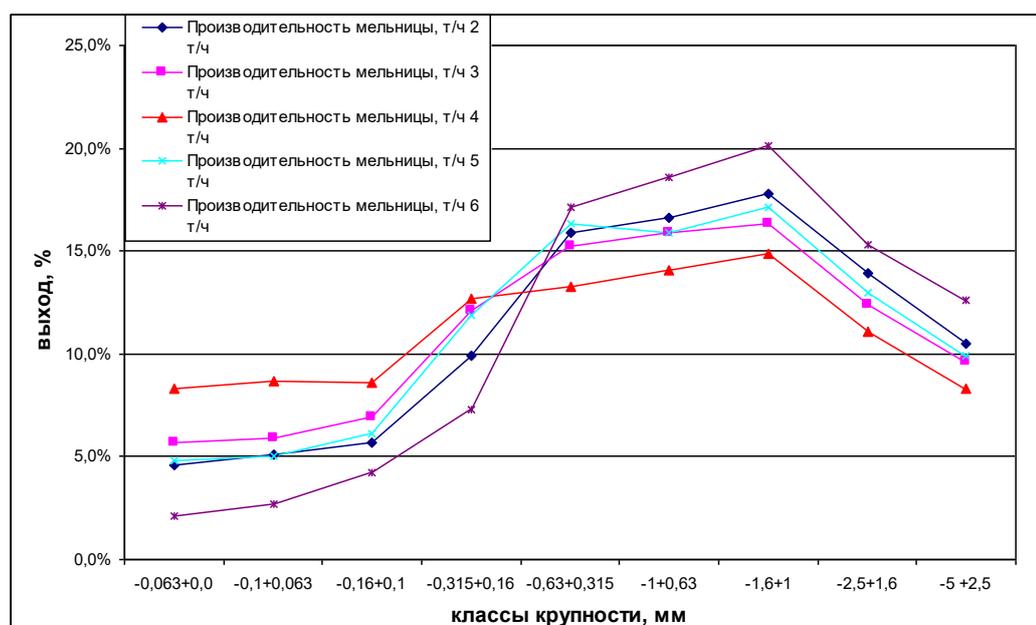


Рисунок 4.18 - Гранулометрическая характеристика продуктов измельчения при разной производительности мельницы ЦМВУ

По результатам проведенных исследований по определению концентрации запыленности работы мельницы ЦМВУ-800 и ее зависимости от производительности при измельчении черносланцевых руд, крупностью $-10+2,5$ мм, установлено, что максимальная эффективность измельчения руды в центробежной мельнице и соответственно максимальное образование тонкодисперсной пыли образуется при производительности 4 т/ч.

Эффект самоизмельчения при образовании циркулирующих потоков прямо пропорционально зависит от исходной загрузки мельницы. Ранее проведенными исследованиями по выявлению зависимости выхода контрольного класса крупности $-0,1$ мм (рисунок 4.19) от производительности мельницы при измельчении черносланцевых руд, крупностью $-12+5$ мм, выявлено, что

максимальный выход контрольного класса -0,1 мм, наблюдается при производительности от 4 до 6 т/ч.

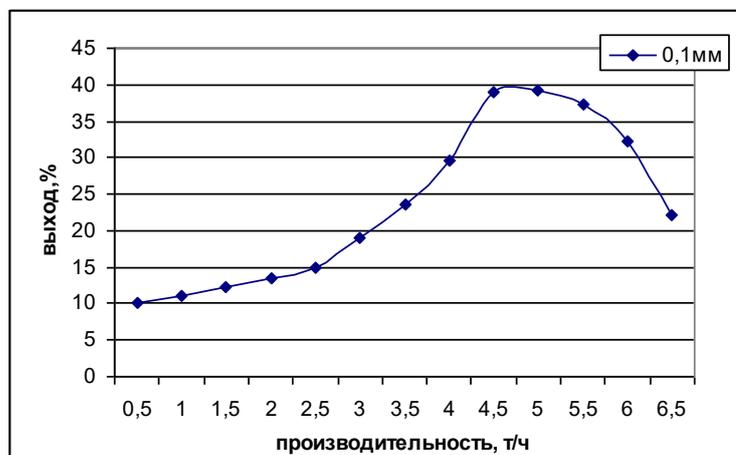


Рисунок 4.19 - Гранулометрическая характеристика продуктов измельчения при разной производительности мельницы ЦМВУ-800

Учитывая полученные результаты экспериментальных исследований для вывода тонкодисперсной пыли, образующейся при работе мельницы ЦМВУ-800, предлагается использовать вентилятор с пылеулавливающим циклоном. Так же предлагается модернизировать защитный кожух установки для наиболее полной герметизации рабочей камеры.

4.3 Исследование работы центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия ЦМВУ-800 при отрицательных температурах

Актуальность работ по исследованию процессов сухого обогащения при высокой влажности (льдистости) продиктовано постоянным перемешиванием руды со снегом и льдом в ходе хранения и складирования руды. Попытки переработки влажных руд при отрицательных температурах на серийных дробилках и измельчителях приводит часто к остановке оборудования.

С учетом того, что центробежная мельница ЦМВУ-800 является аппаратом сухого действия и рассчитана для использования в соответствующих

технологических схемах сухого обогащения, наиболее существенным фактором, влияющим на его работоспособность, является влажность исходного рудного материала, а при работе в отрицательных температурах его льдистость.

Целью данных испытаний являлось исследование технологических особенностей процессов измельчения при переработке руд с высокой исходной влажностью в условиях отрицательных температур [141-143]. Для определения возможности эффективного использования центробежной мельницы ЦМВУ-800 при отрицательных температурах были проведены исследования по оценке влияния исходной влажности рудного материала и льдистости (при отрицательных температурах) на эффективность измельчения [144].

Работы проводились на золотосодержащих сурьмяных рудах Сентачанского месторождения на территории Сарылахской сезонной обогатительной фабрики, расположенной в п. Усть-Нера Оймяконского улуса Республики Саха (Якутия), с апреля по октябрь 2010 г. с охватом периода отрицательных температур.

Исходным материалом служили пробы крупностью $-10+5$ мм с влажностью от 10 до 50% при температуре -15°C . Продукты измельчения проб с разной влажностью подвергались ситовому анализу.

Вид проб крупностью $-10+5$ мм с влажностью 30% и 40% представлен на рисунке 4.20.



Рисунок 4.20 - Пробы с влажностью 30% и 40 % в замерзшем состоянии

На рисунке 4.21 представлен вид измельченной пробы с влажностью 40% при температуре -15°C .



Рисунок 4.21 - Измельченная проба

Зависимость эффективности измельчения по выходу классов крупности $-0,315$ мм представлена на рисунке 4.22.

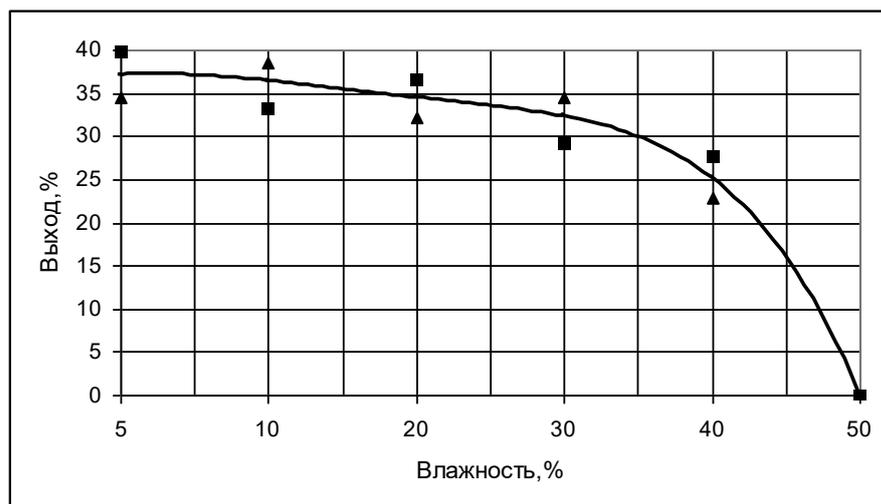


Рисунок 4.22 - График зависимости эффективности измельчения по выходу суммарных классов $-0,315$ мм

Как видно из рисунка 4.22, по мере повышения степени влажности эффективность работы мельницы понижается. Выражается это в ухудшении качества измельченного материала. Если при увеличении влажности до 40% эффективность работы мельницы практически не меняется, то при превышении данного значения выход контрольного класса -0,315 мм полностью прекращается.

Таким образом, установлено, что при влажности обломков руды более 40% эффективность работы центробежной мельницы ЦМВУ-800 резко снижается, при предельном значении влажности 50% рудного материала (при отрицательных температурах) мельница практически перестает измельчать.

Это объясняется тем, что под воздействием механической работы по разрушению частиц руды происходит выделение тепловой энергии. В результате вода из твердой фазы переходит в жидкую. Под воздействием центробежной силы новообразованная влага прижимается к поверхности внешнего рабочего органа и намерзает на ней в виде пленки, толщина которой постепенно нарастает. Таким образом, поверхность рабочего органа начинает футероваться льдом, что естественно значительно снижает качество работы мельницы. Решение этой проблемы мы видим в обеспечении непрерывности работы мельницы в комплексе с дробилкой ДКД-300 [145].

Учитывая физические свойства льда, его удаление в процессе дробления предлагается следующим образом. Лед, в сравнении с горной породой, имеет весьма малую прочность и поэтому разрушается в первую очередь.

Для этого достаточно отделить из продуктов дробления легкую и пылевидную фракцию, в которую переходят частицы льда с использованием потоков воздуха образуемых при вращении роторов дробилки ДКД-300 и в некоторых случаях использование принудительной вентиляции. Попутно будет происходить некоторое сокращение материала. В последующем, при возникновении необходимости хранения дробленого материала, следует принять меры предотвращения попадания на него снега.

В целом, следует отметить, что повышенная влажность или льдистость при отрицательных температурах в комплексе работы мельницы с дробилкой комбинированного ударного действия не являются существенным препятствием для эффективной работы центробежной ступенчатой мельницы.

Полученные результаты позволяют определить область эффективной работы центробежного измельчителя в условиях отрицательных температур окружающей среды по влажности исходной руды.

4.4 Оценка энергетической эффективности опытно-промышленного образца центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800

Рассмотрим энергетическую эффективность работы центробежной мельницы ЦМВУ-800 двумя способами: через скорость движения частиц V_i и потребляемой электрической энергии [146]. На полевых испытаниях на месторождении Задержнинское была достигнута реальная стабильная производительность измельчения кварцевой руды 5,14 т/час [147, 148].

Рабочие органы мельницы приводятся в действие двумя асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором с суммарной мощностью 7,0 кВт, КПД двигателей равна 0,85. Вырабатываемая полезная механическая энергия за 1 час составляет $E_{мех.} = 7,00,85 = 5,95$ кВт час = 5950вт 3600сек = 2,1410⁷ дж, а рассчитанная по формуле (3) с учетом скоростей встречного удара, приобретенная кинетическая энергия равна 2,2910⁷дж.

Удельная потребляемая электрическая энергоёмкость на тонну измельченного

материала составляет: $E_{уд.} = \frac{7,0кВт \cdot час}{5,14т} = 1,36 \frac{кВт \cdot час}{т}$. При переходе выработанной электродвигателями механической энергии только на разрушение, площадь вновь образовавшейся поверхности при измельчении равна:

$$S = \frac{E_{мех.}}{w}, \quad (4.1)$$

где w —удельная поверхностная энергоёмкость, для кварца $\approx 1 \text{ Дж/м}^2$

Вновь образовавшаяся удельная поверхность на массу измельченного материала равна:

$$S_{\text{уд.}} = \frac{S}{M} \quad (4.2)$$

Подставляя формулу (4.1) в (4.2) найдем значения для удельной вновь образовавшейся поверхности, с учетом скорости частицы:

$$S_{\text{уд.}} = \frac{E_{\text{кин.}}}{w \cdot M} = \frac{2,29 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{1 \text{ Дж/м}^2 \cdot 5140 \text{ кг}} = 4,45 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг} \quad (4.3)$$

и потребляемой электроэнергии:

$$S_{\text{уд.}} = \frac{E_{\text{мех}}}{w \cdot M} = \frac{2,14 \cdot 10^7 \text{ Дж}}{1 \text{ Дж/м}^2 \cdot 5140 \text{ кг}} = 4,16 \cdot 10^3 \text{ м}^2 / \text{кг} \quad (4.4)$$

Найденные двумя способами удельные поверхности не сильно разнятся, что подталкивает на мысль об относительной правомерности проведённых расчетов.

Фактическую удельную поверхность вновь образовавшейся при измельчении поверхности можно вычислить исходя из экспериментальных данных. Для простоты расчетов формы измельченных частиц примем за сферические, а за диаметр d_i возьмем средний размер класса. Тогда удельная поверхность при измельчении равна:

$$S_{\text{уд.эксп.}} = \frac{\sum_1^i S_i - S_{\text{исх.}}}{M} \quad (4.5)$$

где S_i —площадь поверхности всех n_i частиц в i -классе, с диаметром d_i , $S_{\text{исх.}}$ — площадь частиц исходного материала до измельчения. Пренебрегая $S_{\text{исх.}}$, так как, как правило $S_{\text{исх.}} \ll S_i$, тогда

$$S_{\text{уд.эксп.}} = \frac{\sum_1^i S_i}{M} = \frac{\sum_1^i n_i \cdot \pi \cdot d_i^2}{M} \quad (4.6)$$

Число частиц n_i в каждом i – классе равно:

$$n_i = \frac{6m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_i^3}, \quad (4.7)$$

где ρ – плотность кварца равная 2700 кг/м³.

Подставляя (4.7) в (4.6) для удельной поверхности вновь образовавшихся частиц получим выражение:

$$S_{\text{уд.эксп.}} = \frac{\sum_1^i \frac{6m_i}{\rho \cdot d_i}}{M} \quad (\text{м}^2/\text{кг}) \quad (4.8)$$

Таблица 4.8- Грансостав продуктов измельчения кварцевой руды (исх. круп. –10+5 мм)

Классы крупности, мм	Средний диаметр d_i , мм	Выход продукта измельчения, %	Масса материала по классам m_i , кг	S_i , м ²
-0,05+0,0	0,025	2,65	136,1	12097
-0,05+0,1	0,075	10,06	517,08	15320,8
-0,2+0,1	0,15	22,24	1143,13	16935,25
-0,315+0,2	0,25	23,20	1192,48	10599,8
-0,63+0,315	0,47	28,71	1475,69	6977,25
-1+0,63	0,81	7,41	380,87	1045
-1,6+1	1,3	3,71	190,69	325,96
-2,5+1,6	2,05	1,48	76,07	82,46
-5+2,5	3,75	0,53	27,24	16,14

Расчеты по формуле (4.8) с использованием экспериментальных данных из таблицы 4.8 дают значение для удельной поверхности 12,33 м²/кг.

Помимо удельной энергоемкости, для сравнения эффективности работ дробильно-измельчительных аппаратов Ревнивцевым В.И. введен коэффициент использования подведенной к материалу энергии («нетто» коэффициент), характеризующий какая часть энергии расходуется на чисто разрушение

$$K = \frac{S_{уд.экс.}}{S_{уд.расч.}} \cdot 100\% \quad (4.9)$$

Данный коэффициент зависит от способа дезинтеграции, а также конструктивных особенностей дробильно-измельчительного оборудования.

Для ЦМВУ-800 «нетто» коэффициент равен 0,24%. На современном уровне технологии дезинтеграции «нетто» коэффициент составляет в лучшем случае, десятые доли процента, так как большая часть производимой в дробильно-измельчительном аппарате энергии тратится в основном на «поддержание» процесса измельчения, и доля энергии которая идет на образование новой поверхности невысока.

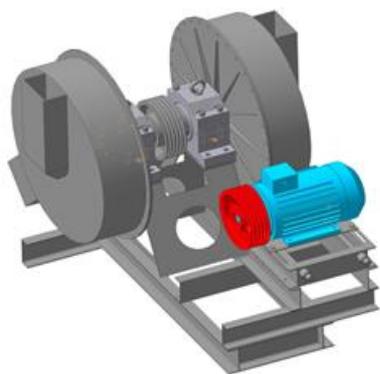
Например, КПД у шаровых и стержневых мельниц составляет сотые доли процента. А наилучшие показатели КПД у ударных центробежных установок, например, таких как Титан М100 и ударно-центробежной мельницы «ТрибокINETИКА-1000» с производительностью до 7 т/ч по кварцевой руде составляет у Титан М 100 – 0,17 % КПД и у ТрибокINETИКИ 1000 – 0,15% КПД.

Таким образом, с учетом простоты конструкции и повышенной удельной производительности и энергоемкости, полученные результаты показывают возможность снижения энергозатрат при измельчении рудных материалов с использованием центробежной мельницы ЦМВУ-800.

4.5 Разработка, испытание, исследование модели вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН

Одной из новых инновационных разработок является новый вертикальный центробежный измельчитель ВЦИ-12, защищенный патентом РФ [149, 150].

Разработка измельчителя частично обоснована на результатах испытаний на мельнице ЦМВУ-800, и представляет собой один из вариантов центробежной мельницы. Был разработан проект измельчителя ВЦИ-12 (рисунок 4.23) с производительностью до 12 т/ч [151].



ПАРАМЕТРЫ	ЕД. ИЗМ.	ПОКАЗАТЕЛИ
НАИБОЛЬШИЙ РАЗМЕР ИСХ. КУСКА	ММ	5 - 20
ДИАМЕТР ВНУТРЕННЕГО ДИСКА	ММ	1200
РАЗМЕРЫ ПРИЕМНОГО ОТВЕРСТИЯ	ММ	280 x 160
РАЗМЕРЫ ВЫПУСКНОГО ЛОТКА	ММ	210 x 220
ЧИСЛО ОБОРОТОВ ВНУТ. ДИСКА	ОБ/МИН	760
ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ	кВт	30
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ	Т/Ч	до 12
МАССА	КГ	6662,5
МАССА БЕЗ ЭЛ. ДВИГАТЕЛЯ	КГ	6512,5

Рисунок 4.23 – Общий вид и основные параметры вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12

В отличие от известных измельчителей ударного и истирающего действия в предлагаемом вертикальном центробежном измельчителе ВЦИ-12 существует дополнительная возможность управления процессом измельчения, за счет регулировки угла разгрузки измельчённого материала и рационального зазора между рабочими органами (дисками), при которых исключается выброс недоизмельчённых частиц из рабочей зоны измельчителя с возможностью получения контролируемой крупности помола продуктов дезинтеграции.

Предлагаемый двухкамерный измельчитель (рисунок 4.24) содержит цилиндрический корпус с верхним загрузочным и нижним разгрузочным узлом, регулирующим угол разгрузки измельчённого продукта и соосные рабочие органы специальной формы в виде вертикально расположенных дисков с радиальными разгонными и отбойными элементами, обеспечивающие многократные динамические и истирающие воздействия на разрушаемый материал, также имеет две симметрично расположенные рабочие камеры, которые позволяют

спроектировать сбалансированную механическую схему привода и увеличить производительность установки до 12 т/ч.

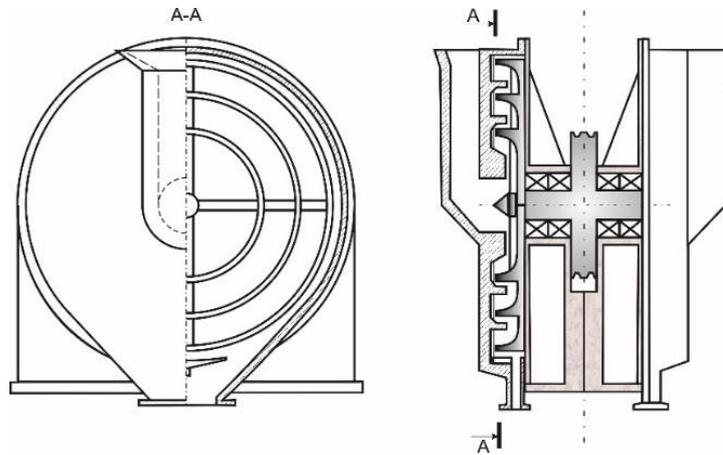


Рисунок 4.24 – Конструкция центробежного вертикального измельчителя

4.5.1 Экспериментальные исследования по определению рациональных рабочих параметров вертикального центробежного измельчителя

Для проведения экспериментальных исследований по определению рациональных рабочих параметров вертикального центробежного измельчителя была разработана и изготовлена лабораторная модель.

Лабораторная модель изготовлена в однокамерном варианте и содержит в себе цилиндрический корпус с верхним загрузочным и нижними разгрузочными отверстиями под разными углами наклона относительно центральной оси корпуса, а также соосные рабочие органы специальной формы в виде вертикально расположенных дисков с радиальными разгонными и отбойными элементами, обеспечивающие многократные динамические и истирающие воздействия на разрушаемый материал. На рисунке 4.25 показана рабочая камера лабораторной модели с подвижным внутренним и неподвижным внешним рабочими органами.

Дезинтеграция происходит следующим образом: разрушаемый материал попадает через загрузочный узел в центр рабочей камеры измельчителя между двумя рабочими дисками специальной формы, ширина камеры (зазор)

регулируется от 1 до 20 мм в зависимости от степени крепости исходного материала и заданной крупности продуктов измельчения.



Рисунок 4.25 – Рабочие органы и рабочая камера лабораторной модели измельчителя

В рабочей камере частицы разрушаемого материала при помощи радиальных разгонных элементов приобретают первоначальную скорость и под действием центробежной силы и силы тяжести, испытывая многократные ударные и истирающие нагрузки, начинают продвигаться к кромке рабочих дисков.

Измельченный материал потеряв массу и инерцию, своевременно выводится из рабочего пространства через разгрузочный узел.

Эффективность измельчения в центробежных дисковых мельницах зависит, прежде всего, от конструкции рабочих органов и от величины зазора между ними.

Для определения рациональной величины зазора между рабочими органами лабораторной модели измельчителя были проведены экспериментальные исследования. При измельчении использовались пробы кварцевой руды твердостью по шкале Мооса – 7, классы крупности: $-5+3$ мм; $-3+2$ мм; $-2,5+1,6$ мм. Частота вращения подвижного рабочего органа составляла 1500 об/мин. Диапазон регулировки зазора между дисками составил от 3 до 10 мм.

На рисунке 4.26 представлены результаты измельчения кварцевой руды класса крупности $-3+2$ мм при наиболее рациональных зазорах от 3 до 7 мм.

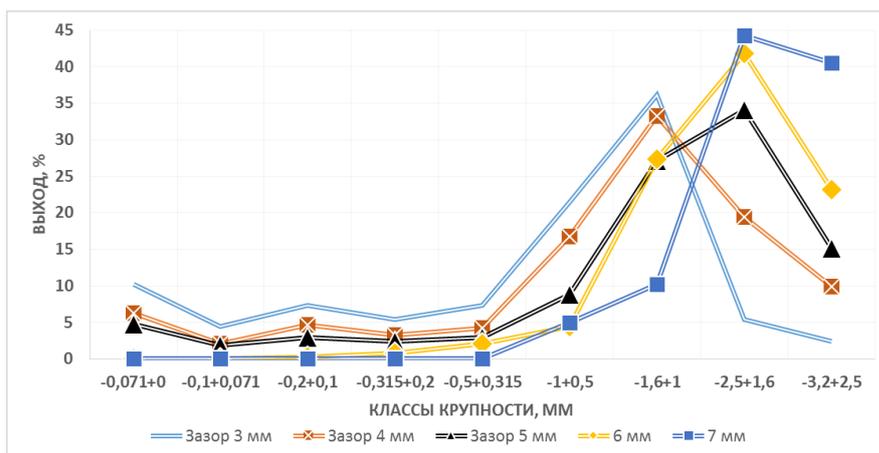


Рисунок 4.26 – Распределение продуктов измельчения при разных зазорах

По результатам измельчения на рисунке 4.26 видно, что при зазоре 3 мм получены наиболее эффективные показатели измельчения.

Далее были проведены экспериментальные исследования по измельчению разных классов крупности. На рисунке 4.27 показаны сравнительные результаты измельчения разных классов крупности (-5+3 мм; -3+2 мм; -2,5+1,6 мм).

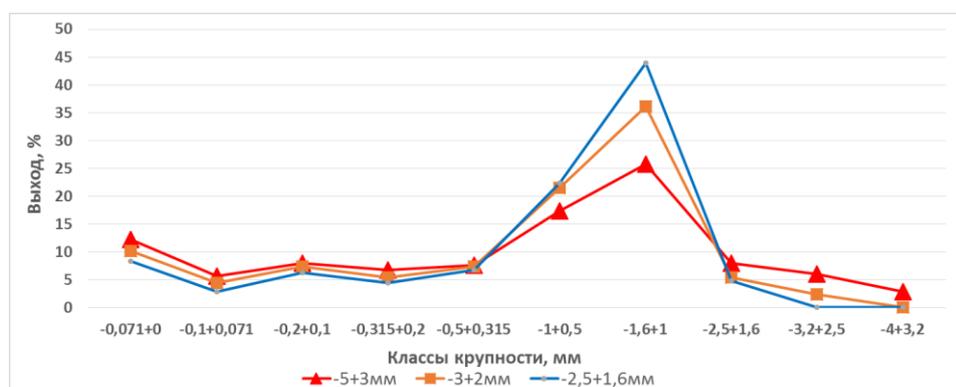


Рисунок 4.27 – Сравнительные результаты измельчения

Из рисунка 4.27 видно, что при измельчении класса крупности -5+3 мм в продуктах измельчения наблюдается наиболее низкий выход характерного критического класса крупности материала -1,6+1 мм, что и определяет, в основном, эффективность процесса измельчения в целом.

В таблицах 4.9, 4.10 и 4.11 представлены результаты экспериментальных исследований по циклическому измельчению кварцевой руды в лабораторной модели от 1 до 3 циклов.

Таблица 4.9 – Результаты исследований при 1 цикле измельчения

Классы крупности, мм	Выход, %		
	-5+3 мм	-3+2 мм	-2,5+1,6 мм
-0,071+0	12,2	10,2	8,3
-0,1+0,071	5,6	4,4	2,9
-0,2+0,1	8	7,3	6,3
-0,315+0,2	6,8	5,4	4,4
-0,5+0,315	7,6	7,3	6,8
-1+0,5	17,3	21,5	22,4
-1,6+1	25,7	36,1	43,9
-2,5+1,6	8	5,4	4,8
-3,2+2,5	6	2,4	0
-4+3,2	2,8	0	0

Таблица 4.10 – Результаты исследований при 2 циклах измельчения

Классы крупности, мм	Выход, %		
	-5+3 мм	-3+2 мм	-2,5+1,6 мм
-0,071+0	11,6	9,4	8
-0,1+0,071	4,8	4,7	3,5
-0,2+0,1	8,7	7,8	7,6
-0,315+0,2	6,3	5,2	5,5
-0,5+0,315	7,7	7,3	7
-1+0,5	21,7	25,1	25,2
-1,6+1	31,9	35,6	40,4
-2,5+1,6	4,8	3,6	2,5
-3,2+2,5	2,4	1	0

Таблица 4.11 – Результаты исследований при 3 циклах измельчения

Классы крупности, мм	Выход, %		
	-5+3 мм	-3+2 мм	-2,5+1,6 мм
-0,071+0	12,8	10,2	9,6
-0,1+0,071	5,1	5,1	4,3
-0,2+0,1	9,2	8,2	7,5
-0,315+0,2	7,2	6,6	5,9
-0,5+0,315	7,7	7,7	6,4
-1+0,5	23,6	25,6	26,7
-1,6+1	30,7	34,3	38
-2,5+1,6	2,5	2	0
-3,2+2,5	1	0	0

В таблице 4.12 приведены сравнительные результаты по циклам по степени измельчения.

Таблица 4.12 – Сравнительные результаты исследований по циклам измельчения

Классы крупности, мм	Степень измельчения ($i = d_n/d_k$)		
	1 цикл	2 цикл	3 цикл
-5+3	5,6	6,4	7,5
-3+2	3,5	4	4,7
-2,5+1,6	2,5	2,9	3,4

Из полученных данных видно, что степень измельчения от 1 до 3 циклов у исходной измельчаемой пробы класса крупности -5+3 мм выше, чем у проб классов крупности -3+2 мм, -2,5+1,6 мм. Очевидно, что это связано с особенностью ударного разрушения в режиме свободного удара, зависящего от массы частицы. Для повышения эффективности измельчения мелких классов крупности возможным вариантом является уменьшение зазора между рабочими органами. Однако, такой путь будет связан с дополнительным разрушением материала за счет истирания, что также может повлиять на другой рабочий параметр измельчителя – повышенный износ рабочих органов. Одним из вариантов повышения эффективности разрушения рудных материалов в данной конструкции измельчителя является формирование в процессе измельчения воздушных потоков за счет вращения рабочих органов, за счет этого часть материала выносится из камеры воздушными потоками без разрушения. Вместе с тем, конструктивная особенность измельчителя позволяет регулировать данный процесс за счет расположения узла разгрузки измельченного материала в корпусе измельчителя.

Как показано на рисунке 4.28, это можно организовать установкой узла разгрузки под определенным углом относительно центральной оси корпуса, что равно и оси вращения рабочих органов измельчителя.

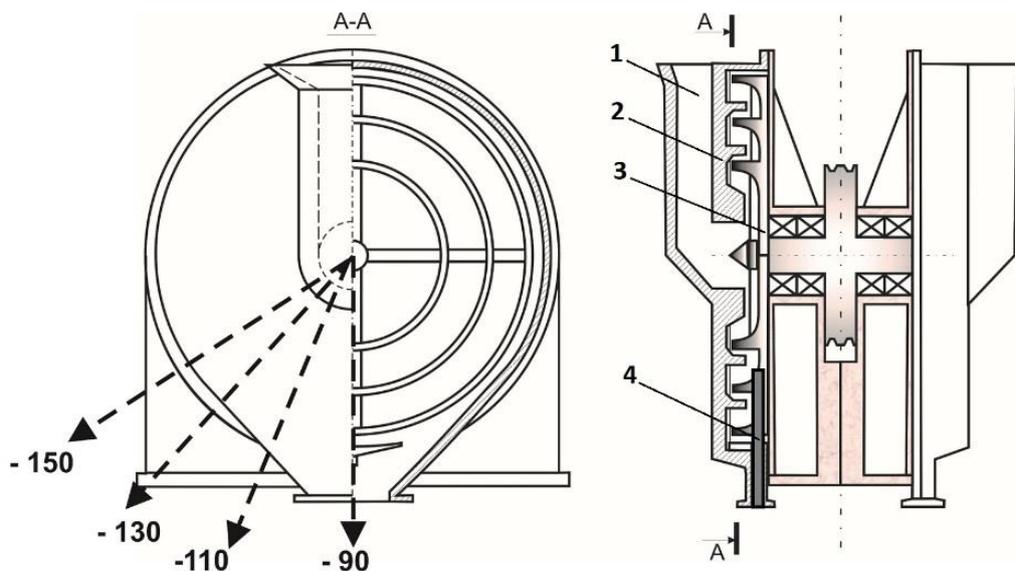


Рисунок 4.28 – Конструкция центробежного вертикального измельчителя при разных углах разгрузки:

1-загрузочное отверстие; 2- неподвижный рабочий орган; 3-вращающийся рабочий орган; 4- регулируемое разгрузочное отверстие

При экспериментальном определении угла разгрузки на эффективность измельчения материала, использовались пробы кварцевой руды твердостью по шкале Мооса – 7, классом крупности $-2,5+1,6$ мм. Экспериментальные исследования проводились на однокамерной модели центробежного вертикального измельчителя с возможностью регулировки угла наклона разгрузочного отверстия относительно соосно установленных рабочих органов, который одновременно отвечает за разгрузку и за качество продуктов измельчения.

На рисунке 4.29 приведены сравнительные результаты измельчения при разных углах наклона разгрузки относительно центральной оси корпуса при наиболее рациональном зазоре 3 мм между рабочими органами, который был определен экспериментальным путем.

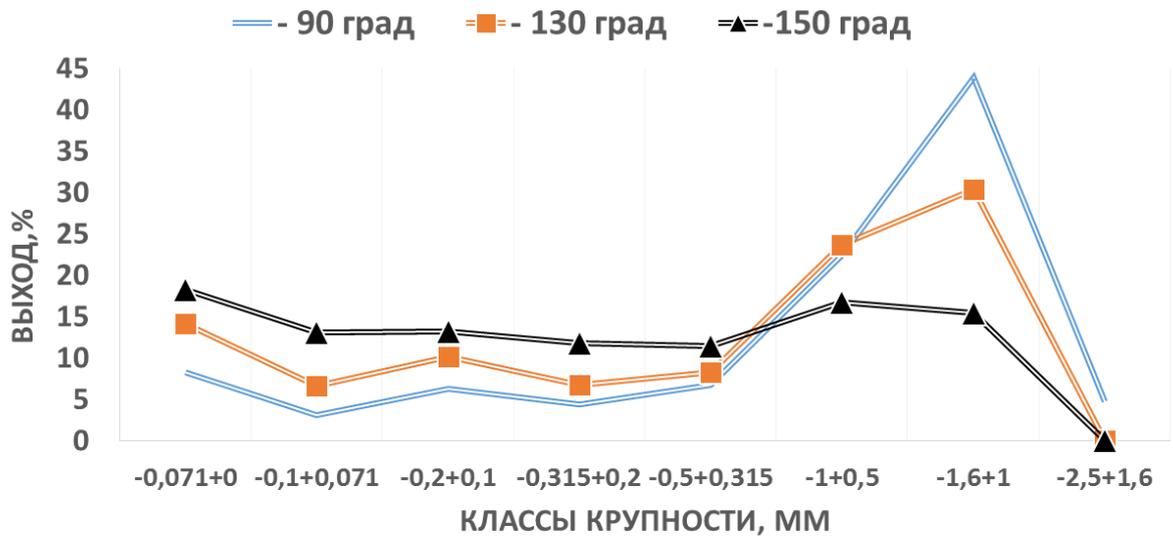


Рисунок 4.29 – Характеристика продуктов измельчения при разных углах разгрузки

На основании полученных результатов установлено, что при угле разгрузки – 150 град, гранулометрический состав продуктов измельчения наиболее равномерный с наибольшим содержанием мелких классов, это объясняется тем, что именно при таком критическом значении угла разгрузки происходит вынос наиболее мелких и легких фракций из зоны измельчения.

Таким образом, были определены наиболее рациональные рабочие параметры вертикальной мельницы (зазор, угол разгрузки), которые позволят управлять процессом измельчения в режиме многократных динамических и истирающих воздействий (исключение выброса недоизмельчённых материалов из рабочей камеры измельчителя) и задавать крупность помола продуктов дезинтеграции.

Также при работе лабораторной модели наблюдалось скопление шлама и неразрушенных частиц на кольцевых отбойных элементах (рисунок 4.30).



Рисунок 4.30 – Скопление неразрушенных частиц на отбойных элементах

Для устранения недостатка внутренняя поверхность кольцевых отбойных элементов должна иметь вогнутую, пологую форму, что будет препятствовать накоплению на них шлама и неразрушенных частиц.

С учетом полученных данных на лабораторной модели измельчителя был разработан эскизный проект основных узлов опытно-промышленного образца вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН производительностью до 12 т/ч. По сравнению с лабораторной моделью в опытно-промышленном образце ожидаются более высокие показатели измельчения, за счет увеличения диаметра рабочих органов (окружной скорости) и коррекции формы отбойных кольцевых элементов.

Таким образом, была разработана, испытана и исследована модель вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН. Были получены исходные данные для проектирования и технической документации на изготовление опытно-промышленного варианта центробежного измельчителя ВЦИ-12.

Полученные результаты исследований на лабораторной модели вертикального центробежного измельчителя позволят повысить эффективность измельчения многократными динамическими и истирающими воздействиями за счет задержки недоизмельченных частиц в рабочей камере благодаря возможности изменения угла разгрузки измельченного материала необходимой крупности [152].

4.5.2 Экспериментальные исследования по определению зависимости эффективности измельчения рудных материалов разной твёрдости по шкале Мооса от угла разгрузки измельченного материала и частоты вращения рабочего органа измельчителя

Ранее экспериментальными лабораторными исследованиями был определён рациональный зазор между рабочими дисками (3мм) и рациональный угол разгрузки (150 град.) для кварцевой руды твердости по шкале Мооса – 7 и крупностью -2,5+1 мм. Для определения рациональных рабочих режимов работы измельчителя и разработки проекта с полным пакетом рабочей документации на изготовление опытно-промышленного варианта вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 с производительностью до 12 т/ч, были проведены экспериментальные лабораторные исследования при измельчении материалов разной твердости при разных значениях числа оборотов рабочих органов. Изменения частоты оборотов производились с помощью преобразователя частоты VACON0020-3L-0012-4+DLRU+LLRU с панелью управления 135N0571 Danfoss (рисунок 4.31).



Рисунок 4.31 – Частотный преобразователь VACON0020-3L-0012-4+DLRU+LLRU

Измельчению подвергались пробы крупностью -2,5 +1,6 мм и твёрдостью по шкале Мооса от 2 до 8. Первоначально для определения рациональной частоты оборотов все пробы разной твердости подвергались измельчению при угле разгрузки равном 90 град, при варьировании частоты оборотов рабочих органов измельчителя в диапазоне – 500-1500 об/мин. В таблицах 4.13-4.19 и представлены полученные сравнительные результаты измельчения геоматериалов разной твердости при разной частоте оборотов рабочего органа лабораторной модели измельчителя ВЦИ-12.

Таблица 4.13 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (гипс) твердостью по шкале Мооса - 2

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин				
	450	500	550	600	650
-0,071+0	12,2	14, 1	30,8	31,3	31,4
-0,1+0,071	22,9	35,6	42,4	42,1	42,1
-0,2+0,1	44,4	39,2	26,8	26,6	26,5
-0,315+0,2	17,7	11,1	0	0	0
-0,5+0,315	2,8	0	0	0	0
-1+0,5	0	0	0	0	0
-1,6+1	0	0	0	0	0
-2,5+1,6	0	0	0	0	0

Таблица 4.14 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (известняк) твердостью по шкале Мооса - 3

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин				
	650	700	750	800	850
-0,071+0	15,4	19,8	27,4	27,9	27,9
-0,1+0,071	13,5	21,3	33,4	33,3	34,5
-0,2+0,1	27,1	35,6	30,3	30,1	29,1
-0,315+0,2	28,9	13,4	8,9	8,7	8,5
-0,5+0,315	15,1	9,9	0	0	0
-1+0,5	0	0	0	0	0
-1,6+1	0	0	0	0	0
-2,5+1,6	0	0	0	0	0

Таблица 4.15 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (флюорит) твердостью по шкале Мооса - 4

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин				
	850	900	980	1050	1150
-0,071+0	10,2	14,4	18,2	18,6	18,8
-0,1+0,071	17,7	21,8	27,8	26,9	25,7
-0,2+0,1	28,1	28,6	34,2	35,1	36
-0,315+0,2	18,2	17,8	10,3	10,1	10,2
-0,5+0,315	14,1	11,9	9,5	9,3	9,3
-1+0,5	11,7	5,5	0	0	0
-1,6+1	0	0	0	0	0
-2,5+1,6	0	0	0	0	0

Таблица 4.16 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (мрамор) твердостью по шкале Мооса – 5

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин				
	1000	1050	1140	1200	1250
-0,071+0	9,7	11,9	12,4	12,6	12,8
-0,1+0,071	7,9	9,8	15,1	14,8	15
-0,2+0,1	8	10,6	9,3	9,7	9,5
-0,315+0,2	10,9	7,8	9,3	9,1	9,2
-0,5+0,315	8,9	9,9	11,2	11,7	11,5
-1+0,5	19,1	19,2	20,6	20,5	20,3
-1,6+1	30,1	26,9	22,1	21,6	21,7
-2,5+1,6	5,4	3,9	0	0	0

Таблица 4.17 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (магнетит) твердостью по шкале Мооса – 6

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин				
	1100	1150	1220	1300	1350
-0,071+0	5,5	8,7	12,2	12,4	12,5
-0,1+0,071	3,9	3,1	7,8	8	8,1
-0,2+0,1	4,1	2,8	6,4	6,5	6,2
-0,315+0,2	6,8	8,7	10,1	9,7	9,9
-0,5+0,315	8,5	12,8	13,5	14,1	13,8
-1+0,5	23,2	24,2	17,9	17,5	17,7
-1,6+1	39,9	33,1	30,2	29,9	30
-2,5+1,6	8,1	6,6	1,9	1,9	1,8

Таблица 4.18 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (кварц) твердостью по шкале Мооса – 7

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин				
	1250	1300	1350	1400	1500
-0,071+0	4,2	4,9	8	8,3	8,3
-0,1+0,071	1,3	1,8	2,7	2,9	3,1
-0,2+0,1	2,1	3,6	5,8	6	6,3
-0,315+0,2	3,9	5,1	3,9	4,2	4,4
-0,5+0,315	8,2	7,2	6,8	6,6	6,8
-1+0,5	20,1	20,9	23	22,7	22,1
-1,6+1	50,1	47,7	44,5	44,2	43,9
-2,5+1,6	10,1	8,8	5,3	5,1	5,1

Таблица 4.19 - Сравнительные результаты измельчения геоматериала (базальт) твердостью по шкале Мооса - 8

Классы крупности, мм	Частота оборотов рабочего органа, об/мин			
	1350	1400	1450	1500
-0,071+0	1	1,1	1,8	2,8
-0,1+0,071	0,8	1,2	2,2	3,1
-0,2+0,1	0,9	2	2,8	3,5
-0,315+0,2	3,1	3,4	5,8	6,7
-0,5+0,315	4,7	4,1	5,3	6
-1+0,5	17,7	24,1	21,8	20,1
-1,6+1	51,7	50,5	48,9	47,7
-2,5+1,6	20,1	13,6	11,4	10,1

На рисунке 4.32 представлены рациональные рабочие режимы (частота вращения раб. органа) для геоматериалов разной твёрдости по шкале Мооса: гипс тв.2 – 550 об/мин; известняк тв.3 – 750 об/мин; флюорит тв.4 – 980 об/мин; мрамор тв.5 – 1140 об/мин; магнетит тв.6 – 1220 об/мин; кварц тв.7 – 1350 об/мин; базальт тв.8 – 1500 об/мин.

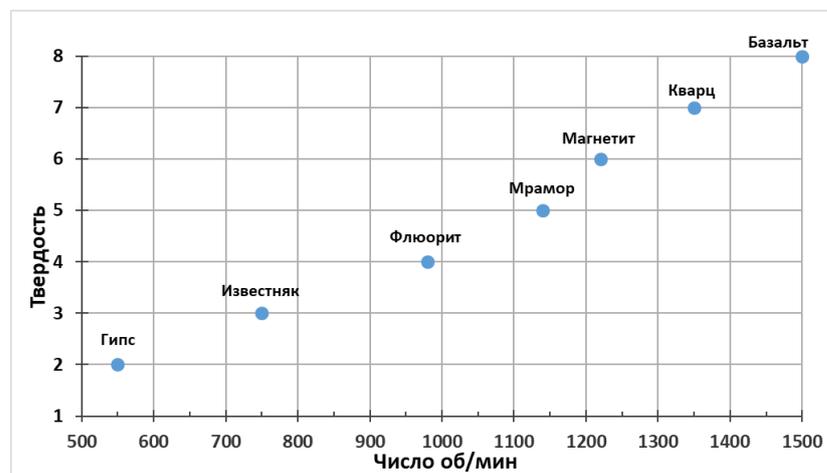


Рисунок 4.32- Сравнительные результаты измельчения проб разной твердости по шкале Мооса

Так как угол разгрузки измельченного материала в вертикальном центробежном измельчителе позволяет управлять эффективностью измельчения дополнительными динамическими воздействиями на разрушаемые частицы за счет увеличения времени их нахождения в рабочей зоне измельчения, то

соответственно, то что для руд различной твёрдости рациональное время нахождения измельчаемых частиц в зоне измельчения, то есть рациональные углы разгрузки измельченного материала должны быть разными.

Для решения данной задачи после определения рациональных частот вращения рабочего органа лабораторного измельчителя для проб разной твёрдости, были проведены лабораторные экспериментальные исследования по определению рационального угла разгрузки измельченного рудного материала по выходу контрольного класса крупности $-0,071$ мм для выборочных проб низкой, средней и высокой твердостью по шкале Мооса – 3; 5 и 7, крупностью $-2,5+1,6$ мм.

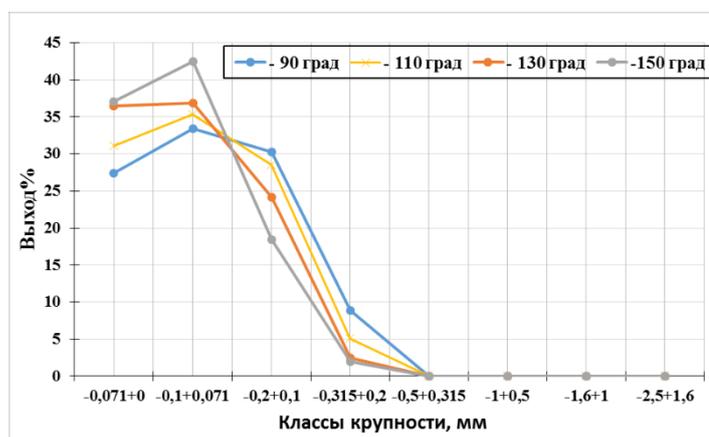


Рисунок 4.33 – Характеристика продуктов измельчения пробы твердостью 3 по шкале Мооса, при разных углах разгрузки

На рис. 4.33-4.35 представлены сравнительные результаты измельчения проб низкой, средней и высокой твердости по шкале Мооса (известняк твердостью – 3, мрамор твердостью – 5, кварц твердостью – 7) при разных углах разгрузки (от -90 до -150 град.).

Как видно по полученным результатам, при измельчении проб низкой твердости (рисунок 4.33) при увеличении угла разгрузки от -90 град до -150 град происходит динамика сокращения крупности измельчаемого материала до класса крупности $-0,2+0,1$ мм с накоплением класса $-0,1+0,071$ мм, при этом выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм при углах разгрузки -130 град и -150 град

практически одинаков (при -130 град $36,5\%$ и при -150 град $37,1\%$). Это объясняется тем, что при измельчении пробы низкой твердости изменение углов разгрузки в диапазоне от -90 град до -150 град происходит разрушение частиц измельчаемой руды крупностью более $0,1$ мм, а частицы крупностью менее $0,1$ мм выносятся воздушным потоком из рабочей камеры (зоны измельчения) без разрушения. Таким образом, наиболее рациональным углом разгрузки при измельчении пробы твердостью 3 по шкале Мооса по выходу контрольного класса крупности $-0,071$ мм является угол равный -130 град.

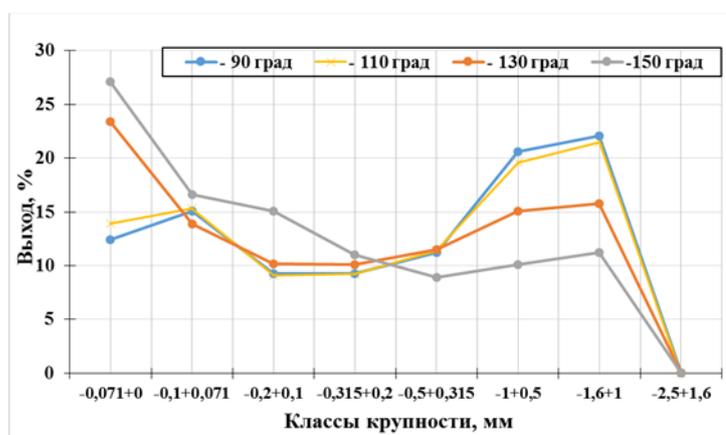


Рисунок 4.34 – Характеристика продуктов измельчения пробы твердостью 5 по шкале Мооса, при разных углах разгрузки

Результаты измельчения проб средней (рисунок 4.34) и высокой твердости (рисунок 4.35) показали повышение выхода контрольного класса крупности $-0,071$ мм с увеличением угла разгрузки измельченного материала с -90 до -150 град. Так выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм при измельчении пробы средней твердости повышается с $12,4$ до $27,1\%$, а при измельчении проб высокой твердости – с $8,3$ до $18,3\%$, при этом за счет дополнительных динамических нагрузок с возрастанием значения угла разгрузки происходит интенсивное сокращение выхода доли частиц более $0,315$ мм при измельчении пробы средней твердости, а при измельчении пробы высокой твердости частиц более $0,5$ мм.

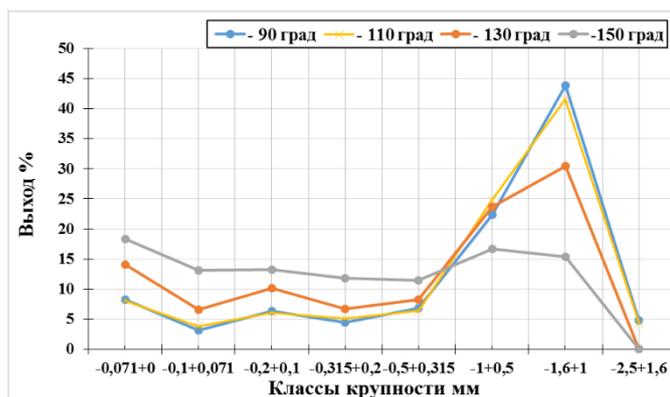


Рисунок 4.35 – Характеристика продуктов измельчения пробы твердостью 7 по шкале Мооса, при разных углах разгрузки

Такой размер сокращаемых классов крупности объясняется тем, что при повышении твердости измельчаемых проб, возрастала и применяемая частота вращения рабочего органа измельчителя (ранее определённые рациональные частоты вращения), соответственно возрастала и скорость воздушного потока, из-за чего увеличивается и размер измельчаемых частиц, выносимых воздушным потоком без разрушения. Так при измельчении проб средней твёрдости рациональная частота вращения составляет 1140 об/мин, а при измельчении проб высокой твёрдости – 1350 об/мин.

Учитывая полученные данные, наиболее рациональным углом разгрузки для измельчения проб твердостью 5 и 7 по шкале Мооса, принят угол равный – 150 град.

Таким образом, экспериментальным путем были получены зависимости эффективности измельчения (по выходу контрольного класса -0,071 мм) от частоты вращения рабочего органа и от угла разгрузки измельченного материала для рудных материалов разной твердости, что позволяет управлять эффективностью их измельчения дополнительными динамическими воздействиями за счет увеличения времени нахождения разрушаемых частиц в рабочей зоне измельчения. Практическая часть исследований на лабораторной модели заключается в подборе рациональных, режимных и конструктивных параметров работы измельчителя,

которые были заложены в проект опытно-промышленного образца вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 [153].

ВЫВОДЫ

Анализ материала, представленного в четвертой главе, позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработан и изготовлен полупромышленный образец центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800, который прошел натурные испытания в составе модульной передвижной рудоподготовительной установки (МПРОУ) при крупнообъемном опробовании месторождений Одолго и Задержнинское. Натурные испытания подтверждены актом «О результатах опытно-промышленных испытаний нового оборудования мобильной рудообогатительной установки (МПРОУ) в процессе поисково-разведочных работ и опытно-промышленной отработки рудопроявления Одолго», подтверждающим возможность применения сухой технологии обогащения золотосодержащих руд с использованием центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800.

2. Опытными испытаниями центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 подтверждена технологическая эффективность способа разрушения многократными ударными воздействиями, заложенными в принцип работы нового оборудования.

3. Определена зависимость эффективности измельчения от производительности мельницы, выявлено, что максимальный выход контрольного класса $-0,1$ мм, происходит при производительности 4,5 т/ч. Определены меры для сокращения выброса тонкодисперсной пыли, образующейся при работе центробежной мельницы ЦМВУ-800.

4. Рассчитана удельная энергоемкость и КПД центробежной ступенчатой мельницы, с учетом простоты конструкции и повышенной удельной производительности и энергоемкости, полученные результаты показывают

возможность снижения энергозатрат при измельчении рудных материалов с использованием центробежной мельницы ЦМВУ-800.

5. В ходе испытания центробежной мельницы ЦМВУ-800, при крупнообъемном опробовании месторождения Одолго Тындинского района Амурской области, наряду с высокой степенью дезинтеграции выявлено ярко выраженное избирательное раскрытие частиц золота. При проведении гранулометрического анализа продуктов измельчения обнаружено явление изометризации золотых частиц. Изучение выделенных золотых частиц после процесса измельчения руд на центробежном измельчителе ЦМВУ-800 показало, что наиболее крупные фракции золота (размером более 0,25 мм) стали иметь форму плотных сфероидов. Деформация золотых частиц произошла без значительной потери массы, и изометризация способствовала повышению их гидравлической крупности.

6. Установлены предельные значения влажности измельчаемого рудного материала на центробежной ступенчатой мельнице ЦМВУ-800 (50 % при отрицательной температуре). Полученные результаты позволяют определить область эффективной работы ступенчатой мельницы в условиях отрицательных температур окружающей среды по влажности исходной руды.

7. Разработана, испытана и исследована модель вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН. Определены рациональные конструктивные и режимные параметры (зазор между рабочими органами, угол разгрузки измельченного продукта и частота вращения рабочего органа для материалов разной твердости) вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-практической задачи повышения эффективности работы отечественных центробежных ударных мельниц авторской разработки за счет организации в их рабочей зоне многократных динамических воздействий на разрушаемые частицы в процессе измельчения, что имеет важное значение в части импортозамещения горного измельчительного оборудования.

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1. Повышение эффективности измельчения рудных материалов в мельницах с ударным принципом работы достигается за счет организации многократных динамических воздействий в рабочей зоне, образованной между противоположно вращающимися рабочими органами разной формы (ступенчатой, конусной, дисковой), при этом обосновано, что наилучшие результаты по дезинтеграции минерального сырья дает ступенчатая форма рабочего органа.
2. На основе проведенных экспериментальных исследований дезинтеграции рудных частиц установлены зависимости разрушения частиц разной крепости и крупности от скорости столкновения, а также критические скорости разрушения частиц разной крупности и крепости по шкале Протоdjяконова.
3. Разработана методика расчета необходимой критической скорости столкновения для разрушения частиц крупностью от 1 до 10 мм разной крепости по шкале Протоdjяконова с использованием разработанного центробежного лабораторного стенда.
4. Разработанные конструкции центробежных мельниц многократного ударного действия и технологии для сухого измельчения рудных материалов защищены патентами РФ (патенты на изобретение РФ № 2209668, №2198028, № 2416463, № 2746502, №2365411, № 2281809, № 2456100, № 94168).
5. Разработана математическая модель и методика расчета скорости столкновения частицы с рабочим органом трехступенчатой мельницы в зависимости от заданной окружной скорости и геометрических параметров

рабочих органов, что позволяет определять наиболее рациональные режимы ее работы при измельчении частиц разной крупности и крепости.

6. Натурные испытания полупромышленного образца ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 в процессе поисково-разведочных работ и опытно-промышленной отработки рудопроявления Одолго показали принципиальную возможность эффективного использования центробежных мельниц многократного динамического воздействия в технологических схемах рудоподготовки, составляющих конкуренцию с традиционным «мокрым» измельчением в шаровых мельницах.

7. По результатам исследований на лабораторной модели и на опытно-промышленном образце ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 установлены зависимости эффективности измельчения от их рабочих параметров. На основе данных зависимостей определены рациональные конструктивно-режимные параметры мельницы: количество ступеней 3 шт.; производительность от 4 до 6 т/ч; частота оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего 2000 об/мин; зазор между рабочими органами 20 мм; влажность (льдистость) измельчаемой руды при отрицательных температурах до 40 %.

8. Экспериментальными исследованиями на лабораторной модели вертикального центробежного измельчителя (ВЦИ) установлены зависимости эффективности измельчения (по выходу контрольного класса -0,071 мм) минерального сырья от частоты вращения рабочего органа и угла разгрузки продуктов измельчения для рудных материалов разной твердости, установленные рациональные конструктивные параметры работы измельчителя (частота вращения рабочего органа, зазор между рабочими органами, угол разгрузки) были заложены в проект опытно-промышленного образца вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12.

Дальнейшее развитие представленной научной работы может состоять в усовершенствовании методики для разработки и проектирования центробежных мельниц многократного динамического воздействия разного типоразмера и

производительности, а также в уточнении уровня влияния аэродинамических потоков, образующихся в рабочей камере мельницы на эффективность измельчения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барон Л.И. Разрушаемость горных пород свободным ударом / Л.И. Барон, И.Е. Хмельковский. – М. : Изд-во Наука, 1971г. – 203 с.
2. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев. – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с.
3. Кононенко, В. Н. Резонансное разрушение горных пород при дроблении и измельчении / В. Н. Кононенко, К. В. Халкечев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 1. – С. 231 – 235.
4. Кубачек, В. Р. Критерии ударного разрушения горных пород / В. Р. Кубачек, В. И. Сантов, Н. И. Паладеева // Известия вузов – Горный журнал. – 1985. – № 8. – С. 75 – 78.
5. Кубачек, В. Р. Параметры разрушения горных пород свободным ударом / В. Р. Кубачек, В. И. Сантов, Н. И. Паладеева // Строительные и дорожные машины. – 1985. – № 6. – С. 17 – 18.
6. Саитов, В. И. Условия подобия процессов разрушения горных пород при дроблении / В. И. Сантов // Известия вузов – Горный журнал. – 1986. – № 10. – С. 59 – 63.
7. Вайсберг, Л. А. Современное дробильно-измельчительное и обогатительное оборудование "Механобр -Техники" / Л. А. Вайсберг // Тезисы докладов II конгресса обогатителей стран СНГ. – М. : МИСиС, 1999. – С. 22 – 23.
8. Вайсберг, В. М. Эксплуатация дробильных и измельчительных установок / В. М. Вайсберг. – М. : Недра, 1989. – 196 с.
9. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1977. – 368 с.
10. Протасов, Ю. И. Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю. И. Протасов. – М. : Недра, 1985. – 242 с.
11. Хопунов, Э. А. Исследование механизма селективного разрушения руд / Э. А. Хопунов // Интенсификация технологических процессов рудоподготовки :

- междуведомственный сборник научных трудов – Л. : Механобр, 1987. – С. .113 – 116.
12. Совершенствование процессов дробления, измельчения, грохочения и классификации руд и продуктов обогащения : междуведомственный сборник научных трудов. – Л. : Механобр, 1985. – 170 с.
 13. Лесин, А. Д. Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции : междуведомственный сборник научных трудов / А. Д. Лесин, И. В. Роженцов. – Л. : Механобр, 1989. – С. 125 – 132.
 14. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С. Е. Андреев, В. А. Перов, В. В. Зверевич В.В. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1980. – 415 с.
 15. Андреев, С. Е. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава / С. Е. Андреев. – М. : «Металлургиздат», 1959.
 16. Андреев, С. Е. О законах дробления / С. Е. Андреев // Горный журнал. – 1962. – № 4. – С. 66 – 70.
 17. Серго, Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Е. Е. Серго. – М., 1977. – 285 с.
 18. Гийо, Роже. Проблема измельчения материалов и ее развитие / Гийо Роже М. : «Стройиздат», 1964.
 19. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механического удара. / Я. Г. Пановко. – М. : Наука, 1977. – 224 с.
 20. Ненарокомов, Ю. Ф. Современное состояние и направления развития рудоподготовки / Ю. Ф. Ненарокомов [и др.] // Труды Механообра. – Л. : Механобр, 1974. – Вып. 140. – С. 5 – 8.
 21. Перов, В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / В. А. Перов, В. Е. Андреев, Л. Ф. Биленко. – М. : Недра, 1990. – 301 с. (С. 90 – 93).
 22. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. – СПб. : АНО НПО «Профессионал», 2004. – Ч. 1. – 726 с.

23. Михалюк, А. В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках / А. В. Михалюк. – Киев : Наукова Думка, 1980. – 154с.
24. Axelson J. W., Piret E. L. Crushing of single particles of crystalline quartz-application of slow compression // *Industrial & Engineering Chemistry*. – 1950. – V. 42. – № 4. – pp. 665 – 670.
25. Adams J. T., Johnson J. F., Piret E. L. Energy—new surface relationship in crushing. Part II. Application of permeability measurement to an investigation of the crushing of halite // *Chemical Engineering Progress*. – 1949. – Т. 45. –V. 11. – pp. 655 – 660.
26. Zhang, ZX., Ouchterlony, F. Потребность в энергии для разрушения горных пород в лабораторных экспериментах и инженерных операциях : обзор // *Rock Mec.h Rock Eng.* 55. –pp. 629 – 667 (2022).
27. Gilman J. J. Direct measurements of the surface energies of crystals // *Journal of applied physics*. – 1960. – V. 31. – № 12. – pp. 2208 – 2218.
28. Brace W. F., Walsh J. B. Some direct measurements of the surface energy of quartz and orthoclase // *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*. – 1962. – V. 47. – № 9-10. – pp. 1111-1122.
29. Shi F., Kojovic T. Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect // *International Journal of Mineral Processing*. – 2007. – V. 82. – № 3. – pp. 156 – 163.
30. Ходаков, Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходаков. – М. : Наука, 1972.
31. Ревнивцев, В. И. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев, В. Г. Гапонов, Л. П. Загоратский и [др.]. – М. : Недра, 1988. – 286 с.
32. Ревнищев, В. И. Основные направления развития подготовки руд к обогащению / В. И. Ревнищев, И. М. Костин, В. П. Яшин // *Цветные металлы*. – 1984. – № 5. – С. 96 – 100.
33. F. C. Bond, “The Third Theory of Comminution,” *Transactions on AIME Mining Engineering*. – 1952. – Vl. 193. – pp. 484 – 494.
34. Николаева, Е. А. Основы механики разрушения : учебное пособие / Е. А. Николаева. – Пермь : Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2010. – 14 с.

- 35.Хлебников, Г. Д. Исследование закономерностей разрушения горных пород при дроблении : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Хлебников Г. Д. – М. : Университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 1968. – 20 с.
- 36.Паладеева, Н. И. Дробилки ударного действия / Н. И. Паладеева // Известия вузов – Горный журнал. – 1996. – №10-11. – С. 139 – 145.
- 37.Барон, Л. И. Исследование влияния скорости приложения ударной нагрузки на эффект дробления горных пород / Л. И. Барон, В. С. Вобликов, Ю. Г. Коняшин // Сборник трудов ВНИИНеруда. – Тольятти, 1965. – Вып. 19.
38. Патент № 2111056 Российская Федерация, МПК 6 В 02 С 23/20. Способ комбинированного ударного дробления : № 96108040/03 : заявл. 23.04.1996 : опубл. 20.05.1998 / Матвеев А.И. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН // Бюл. № 14.
- 39.Матвеев, А. И. Новое в рудоподготовке – аппараты дробления и измельчения многократного ударного действия / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2016. – Спец. выпуск № 21. – С. 242 – 252.
- 40.Матвеев, А. И. Новые перспективные аппараты рудоподготовки золотосодержащих руд / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // V конгресс обогатителей стран СНГ: материалы Конгресса. – М. : Альтекс, 2005. – Т. II. – С. 151 –153.
- 41.Матвеев, А. И. Дробилки и мельницы многократного ударного действия / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов, П. Б. Нечаев // VIII Конгресс обогатителей стран СНГ : сборник материалов, г. Москва, 28 февраля – 02 марта 2011 г. – М. : МИСиС, 2011. – Т. 1. – С. 282 – 283.
- 42.Матвеев, А. И. Развитие метода разрушения «свободным» ударом при реализации способа многократного динамического воздействия для процессов рудоподготовки / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Материалы XI Конгресса обогатителей стран СНГ, Россия, г. Москва 13-15 марта 2017 г. – М., 2017. – С. 376 – 379.

43. Патент № 2111055 Российская Федерация, МПК 6 В02, С 13/20. Дробилка комбинированного ударного действия : № 06108301/03 : заявл.23.04.1996 : опубл.20.05.1998 / Матвеев А. И., Винокуров В. П., Григорьев А. Н., Монастырев А. М. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН // Бюл. № 14.
44. Львов, Е. С. Экспериментальные исследования по определению влияния исходных размеров руды на характер разрушения в процессе дробления в аппарате комбинированного ударного действия ДКД-300 / Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12, Ч. 5. – С.1004 – 1009.
45. Львов, Е. С. Исследование процессов дробления в дробилках многократного ударного действия РД-МДВ-900 и ДКД-300 / Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12, Ч. 6. – С.1121–1125.
46. Матвеев, А. И. Исследование дезинтеграции золотосодержащих руд в дробильных агрегатах УКОРП, Бармак и ДКД-300 / А. И. Матвеев, Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2004. – С. 278 – 280.
47. Матвеев, А. И. Оценка выхода фракций строительного щебня при дроблении каменно-бутового сырья на дробилке комбинированного действия ДКД-300 / А. И. Матвеев, Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 27 – 29.
48. Матвеев, А. И. Исследование дезинтеграции золотосодержащих руд в дробильных агрегатах / А. И. Матвеев, Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Проблемы и перспективы развития горных наук : сборник Международной конференции, посвященной к 60-летию Горно-геологического института СО АН СССР – Института горного дела СО РАН. – Новосибирск, 2004. – С. 161 – 164.

49. Беренс, Д. Новые конструкции машин ударного действия для тонкого и сверхтонкого размола / Д. Бернс // Труды Европейского совещания по измельчению. – М. : Стройиздат, 1966. – С. 444 – 470.
50. Смирнов, Н. М. Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности : дис. ... д-ра техн. наук / Н. М. Смирнов. – Иваново, 1997. – 390 с.
51. Олевский, В. А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В. А. Олевский. – М. : Государственное научно-техническое издательство по горному делу, 1963. – 12 с.
52. Алешкевич, В. А. Курс общей физики. Механика / В. А. Алешкевич, Л. Г. Деденко, В. А. Караваев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 472 с. (С. 101).
53. Лисица, А. В. Центробежно-ударная дробилка / А. В. Лисица // Интернет-версия журнала «Стройка». – 2005. – № 19. .URL:<http://stroit.ru/stati/tsentrobezno-udarnaya-drobilka>. (дата обращения - 28.07.2023).
54. Rumpf H. Versuche zur Bestimmung der Teilchenbewegung in Gasstrahlen und das Beanspruchungsmechanismus in Strahlmuhlen. Chemie — Ingenieur // Technic. 1960, Bd. 32, N 5, pp. 335 – 342.
55. Труды европейского совещания по измельчению, г. Франкфурт-на-Майне. [Перевод Л. А. Ласточкина]. – М. : Издательство литературы по строительству, 1966. – 603 с. (С. 452).
56. Berens D. Zerkleinerung maschinen. Chem. Ingr. // Techn., 1965. – V. 37, N 7. -pp. 751 – 755.
57. В. Грюндер. Новые конструкции ударных дробилок крупного дробления Грюндер // Труды I Европейского совещания по измельчению, г. Франкфурт-на-Майне, 1962. – М. : Стройиздат, 1966. – Гл. 2. – С. 472 – 480.
58. Мурог, В. Ю. Помольно-классифицирующие мельницы дезинтеграторного типа / В. Ю. Мурог, П. Е. Вайтехович, Д. Н. Боровский // Труды БГТУ. Сер. III

- : Химия и технология неорганических веществ. – Минск, 2008. – Вып. XVI. – С. 113 – 117.
- 59.Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы; под общ. ред. О. С. Богданова. – М. : Недра, 1982. – 366 с.
- 60.Оспанов, А. А. Основы эффективного измельчения и механики разрушения / А. А. Оспанов, Ш. К. Тлегенов. – Алматы, 2000. – 107 с.
- 61.Широков, Г. Ю. Механохимия. Теоретические основы / Г. Ю. Широков. – Иваново : ФГБОУ ВПО Ивановский государственный химико-технологический университет, 2015. – 214 с.
- 62.Матвеев А.И. Технологии сухого обогащения руд малых коренных месторождений и рудопроявлений золота на основе модульных передвижных установок : дис. ...док. техн. наук : 25.00.13 /Матвеев Андрей Иннокентьевич. – М., 2004. – 318 с.
- 63.Матвеев А.И. Технологии сухого обогащения руд малых коренных месторождений и рудопроявлений золота на основе модульных передвижных установок : автореф. ...док. техн. наук. – М., 2004. – 57 с.
- 64.Патент № 2150323 Российская Федерация, МПК В02, С 13/20. Центробежный измельчитель встречного удара : № 97117784/03 : заявл. 28.10.1997 : опубл. 10.06.2000 / Матвеев А. И., Григорьев А. Н., Филиппов В. Е. ; заявитель Ин-т горного дела Севера СО РАН // Изобретения. Полезные модели. – 2000. – № 16. – Ч. 2. – С. 268.
- 65.Патент № 2193447 Российская Федерация, МПК 7 В02, С 13/20. Центробежный конусный измельчитель : № 2000127982 : заявл. 09.11.2000 : опубл. 27.11.2002 / Матвеев А. И., Григорьев А. Н., Яковлев В. Б., Федосеев С. М., Перов А. В., Гладышев А. М., Олефир И. В. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН // Изобретения. Полезные модели. – 2002. – № 33. – Ч. 2. – С. 215 – 216.
- 66.Патент № 2198028, МПК 7 В02, С 13/20. Центробежный измельчитель : № 2001101030 : заявл. 11.01. 2001 : опубл. 10.02.2003 / Матвеев А. И., Григорьев

- А. Н., Винокуров В. Р. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН // Изобретения. Полезные модели. – 2003. – № 4. – Ч. 2. – С. 338.
67. Матвеев, А. И. Новая установка для дезинтеграции полиминерального сырья / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья : материалы Международной научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2003. – С. 391 – 394.
68. Матвеев, А. И. Центробежный измельчитель / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Драгоценные металлы и камни – проблемы добычи и извлечения из руд, песков и вторичного сырья : Тезисы докладов 2-ой Международной конференции и выставки, г. Иркутск, 25-30 июня 2001 г. – Иркутск : Иргиредмет, 2001. – С. 3 – 4.
69. Матвеев, А. И. Центробежные установки ударного действия для тонкого размола / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, И. Ф. Лебедев, Е. С. Львов // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья : материалы Международной научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2003. – С. 394 – 399.
70. Матвеев, А. И. Разработка и совершенствование центробежных измельчителей ударного действия для глубокого раскрытия рудного золота / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // IV конгресс обогатителей стран СНГ : сборник материалов VI конгресса обогатителей стран СНГ. – М., 2007. – Т. 1. – С. 224 – 226.
71. Матвеев, А. И. Исследование процессов дезинтеграции золотосодержащих руд в центробежном измельчителе / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, В. Е. Филиппов, С. М. Федосеев, В. З. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 8. – С. 177 – 178.
72. Матвеев, А. И. Разработка центробежных мельниц многократного ударного действия с разной конструкцией рабочих органов / А. И. Матвеев, В. Р.

- Винокуров // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы XXII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. – М., 2017. – С. 96 – 100.
73. Матвеев. Исследование работоспособности центробежного дискового измельчителя при повышенной влажности / Матвеев А.И., Филиппов В.Е., Винокуров В.Р., Львов Е.С. // Проблемы и перспективы развития горных наук : Труды Международной конференции, посвященной 60-летию образования Горно-геологического института СО АН СССР – Института горного дела СО РАН, г. Новосибирск, 01 - 05 ноября 2004 г. – Новосибирск, 2004. – С. 179 – 182.
74. Филиппов, В. Е. Влияние влажности и льдистости на эффективность работы дискового измельчителя / В. Е. Филиппов, В. Р. Винокуров, А. И. Матвеев, Е. С. Львов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы Международной научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 06-10 июля 2004 г. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2004. – С. 187 – 290.
75. Матвеев, А. И. Экспериментальные исследования дезинтеграции геоматериалов в измельчителе многократного динамического воздействия / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 11. – С. 370 – 372.
76. Матвеев, А. И. Особенности измельчения геоматериалов в центробежных аппаратах многократного динамического воздействия / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 201 – 203.
77. Матвеев, А. И. Интенсификация процессов рудоподготовки геоматериалов перед обогащением на основе новых аппаратов многократного динамического воздействия / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : Труды

- Всероссийской конференции с участием иностранных ученых, г. Новосибирск 09-12 октября 2012 г. – Новосибирск : Изд-во Ин-та горного дела им. Н.А.Чинакала СО РАН, 2012. – С. 293 – 298.
78. Матвеев, А. И. Интенсификация процессов рудоподготовки с использованием новых аппаратов многократного динамического воздействия / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Р. Винокуров, Е.С. Львов // IX Конгресс обогатителей стран СНГ : сборник материалов, г. Москва, 26 – 28 февраля 2013 г. – М. : МИСиС, 2013. – Т. 2. – С. 381 – 383.
79. Матвеев, А. И. Влияние циркулирующих потоков на эффективность измельчения в центробежной мельнице со ступенчатыми рабочими органами / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2009. – С. 99 – 101.
80. Винокуров, В. Р. Новые конструкции мельниц ударно-центробежного типа / В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12, Ч. 5. – С. 965 – 970.
81. Винокуров, В. Р. Особенности сухого измельчения геоматериалов в мельницах многократного ударного действия с разной конструкцией центробежных активаторов / В. Р. Винокуров // Проблемы горной науки: взгляд молодых ученых : материалы научной конференции молодых ученых и специалистов ИГДС СО РАН, посвященной памяти академика РАН Николая Васильевича Черского, г. Якутск, 7 февраля 2012 г. – Якутск : Изд-во ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. – С. 12 – 17.
82. Винокуров, В. Р. Исследование особенностей дезинтеграции геоматериалов в центробежных мельницах многократного ударного действия / В. Р. Винокуров // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России : труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти чл. -кор. РАН Новопашина М.Д., г. Якутск,

- 16-19 июня 2015 г. – Якутск : Изд-во «СМИК-Мастер. Полиграфия», 2015. – С. 69 – 72.
- 83.Винокуров, В. Р. Сравнительные испытания центробежных установок ударного действия для тонкого размола / В. Р. Винокуров // Анализ состояния и развития Байкальской территории: минерально-сырьевой комплекс : материалы Всероссийской научно-технической конференции с Международным участием, г. Улан-Удэ, 20-24 июня 2006 г. – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. – С. 68 – 71.
- 84.Винокуров В.Р. Испытания центробежных измельчителей с разной формой активаторов / В.Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - № S2. - С. 193-196.
- 85.Барон, Л. И. Дробимость горных пород / Л. И. Барон, Ю. Г. Коняшин, В. М. Курбатов ; ИГД им. А. А. Скочинского. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 167 с.
- 86.Фепплъ, А. Сила и деформация. Прикладная теория упругости / А. Фепплъ, Л. Фепплъ. – Л. : Объединенное научно-техн. изд-во НКТП СССР, 1936. – 408 с.
- 87.Теория разрушения горных пород. Лабораторный практикум. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. – 15 с.
- 88.ГОСТ 30629-2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний. Издание официальное. Система межгосударственных нормативных документов в строительстве. Основные положения = Interstate council for standardization, metrology and certification / Разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт по проблемам добычи, транспорта и переработки минерального сырья в промышленности строительных материалов» (ФГУП «ВНИПИИстромсырье») – Москва : Стандартинформ, 2012. – 29 с. (С. 20).
- 89.Черкасов, С. В. Материаловедение. Лабораторный практикум : учебное издание / С. В. Черкасов, Л. Н. Адоньева. – Воронеж, 2009. –90 с. (С.16).

90. Косых, А. В. *Материаловедение. Искусственные и природные строительные материалы, и изделия : учебное пособие / А. В. Косых, Н. А. Лохова, И. А. Макарова.* – 38 с.
91. Барон, Л. И. *Исследование сопротивляемости горных пород разрушению при отражательном дроблении / Л. И. Барон, Б. В. Михайлов, И. Е. Хмельковский // Сборник научных трудов ВНИИНеруд. – Тольятти, 1968. – Вып. 24. – С. 1.*
92. Матвеев, А. И. *Исследование половинчатого разрушения частиц на лабораторном центробежном стенде / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Д. А. Осипов // Проблемы комплексного освоения георесурсов : сборник материалов Международной конференции, г. Хабаровск, 2007 г. – Хабаровск, 2007. – С. 33 – 36.*
93. Матвеев, А. И. *Исследование половинчатого разрушения частиц на лабораторном центробежном стенде / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Д. А. Осипов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – Отдельный выпуск 16: Дальний Восток. – С. 307 – 310.*
94. Vinokurov V.R. *Determination of rational process variables for multi-step centrifugal mills. Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, V. 773 V.R Vinokurov IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 773 (2021) 012072. (In Russian) doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012066.*
95. Винокуров, В. Р. *Методика расчета оптимальных рабочих параметров рудоразмольного оборудования многократного ударного действия / В. Р. Винокуров // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны : Труды Международной научно-практической конференции, г. Якутск, 14-17 июня 2005 г. – Якутск : Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2005. – Т. 3. – С. 27 – 30.*
96. Матвеев, А. И. *Методика расчета оптимальных рабочих параметров рудоразмольного оборудования многократного ударного действия / А. И.*

- Матвеев, В. Р. Винокуров, С. М. Федосеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – Вып. 1: – Региональное приложение Якутия. – С. 274 – 278.
97. Матвеев, А. И. Разработка методики расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного динамического воздействия / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Наука и образование. – 2012. – № 1. – С. 32 – 34.
98. Винокуров, В. Р. Расчет скорости движения разрушаемых частиц в центробежной ступенчатой мельнице / В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 12. – С. 106 – 108.
99. Винокуров, В. Р. Моделирование разрушения частиц геоматериалов в центробежных мельницах / В. Р. Винокуров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-16488> (дата обращения - 28.07.2023).
100. Матвеев, А. И. Моделирование разрушения геоматериалов в центробежной мельнице / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья»: материалы Международного совещания, г. Алматы, 16–19 сентября 2014 г. – Караганда, 2014. – С. 117 – 118.
101. Матвеев, А. И., Винокуров В.Р. Расчет скоростей взаимодействия частиц с рабочими органами в центробежной мельнице со ступенчатым активатором / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // X Конгресс обогатителей СНГ : сборник материалов. – М. : МИСиС, 2015. – Т. 1. – С. 140 – 142.
102. Винокуров, В. Р. Методика расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного динамического воздействия / В. Р. Винокуров, А. И. Матвеев // Геомеханические и геотехнические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России»: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной

- памяти чл.- кор. РАН Новопашина М.Д., г. Якутск, 14-15 сентября 2011 г. – Якутск : Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. – С. 151 – 154.
103. Винокуров, В. Р. Разрушение частиц геоматериалов в центробежном аппарате многократного ударного действия / В. Р. Винокуров // Пути решения актуальных проблем добычи и переработки полезных ископаемых. Добыча золота в условиях Крайнего Севера : материалы Республиканской научно-практической конференции, посвященной 90-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия) – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2014. – С. 109 – 115.
104. Францкевич, В. С. Моделирование и оптимизация технологических процессов : методическое пособие / В. С. Францкевич, Д. Н. Боровский. – Минск : Изд-во БГТУ, 2016.
105. Винокуров, В. Р. Экспериментальные исследования по определению влияния скорости воздушного потока на процесс измельчения в центробежной ступенчатой мельнице / В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 9. – С. 158 – 164.
106. Vinokurov, V.R. Determination of rational process variables for multi-step centrifugal mills. Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 773 V.R Vinokurov IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 773 (2021) 012072. (In Russian) doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012066.
107. Винокуров, В. Р. Интенсификация процесса измельчения в мельницах многократного ударного действия / В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2017. – Спец. выпуск № 24 : Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. – С. 154 – 161.
108. Матвеев, А. И. Экспериментальные исследования по интенсификации процессов измельчения в ступенчатой центробежной мельниц / А. И. Матвеев,

- В. Р. Винокуров // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. Т. – 24. – № 2. – С. 56 – 63.
109. Винокуров, В. Р. Интенсификация процесса измельчения в мельнице многократного ударного действия ЦМВУ-800 / В. Р. Винокуров // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы XXIII Международной конференции, г. Екатеринбург, 10-13 апреля 2018 г., проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады 09-18 апреля 2018 г. – Екатеринбург: Из-во «Форт Диалог-Исеть», 2018. – С. 47 – 51.
110. Патент № 2176550 Российская Федерация, МПК 7B02C13/14. Способ ударного дробления. № 99122195 : заявл. 22.10.1999 : опубл. 10.12.2001 / Матвеев А. И. Филиппов В. Е., Федосеев С. М., Гладышев А. М., Березовский В. Ф., Борисов В. З., Григорьев А. Н., Перов А. В. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН // Изобретения. Полезные модели. – 2001. – № 34. – С. 243.
111. Матвеев, А. И. Конструктивные особенности центробежной мельницы ЦМВУ-80 / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 30 – 31.
112. Матвеев, А. И. Предварительные технологические испытания нового оборудования модульной рудообогатительной установки / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Е. Филиппов, А. М. Гладышев // Обогащение руд. – 2003. – № 5. – С. 40 – 44.
113. Матвеев, А. И. Исследование по технологическому испытанию руд месторождения «Задержнинское» / А. И. Матвеев, Н. Г. Еремеева, Е. С. Слепцова, С. И. Саломатова // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья : Международная научно-техническая конференция, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2003. – С. 136 – 138.
114. Матвеев, А. И. Крупнообъемное геологическое опробование с использованием оборудования модульной рудообогатительной установки / А.

- И. Матвеев, В. Е. Филиппов, И. Ф. Лебедев, А. Н. Григорьев, С. М. Федосеев // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья : Международная научно техническая конференция, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2003. – С. 509 – 512.
115. Матвеев, А. И. Использование модульной рудообогатительной установки при геологическом крупнообъемном опробовании месторождения «Одолго» / А. И. Матвеев, И. Ф. Лебедев // Южная Якутия- новый этап индустриального развития : Труды Международной научно-практической конференции, г. Нерюнгри, 24-26 октября 2007 г. – Нерюнгри : Изд-во Технического института, 2007. – Т. 1. – С. 335 – 339.
116. Матвеев, А. И. Перспективы применения модульных передвижных рудообогатительных установок : монография / А. И. Матвеев, В. П. Винокуров, В. М. Федоров ; отв. редактор А. И. Чикидов. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1997. – 118 с.
117. Матвеев, А. И. Раздельная разработка месторождений минерального сырья с использованием передвижных модульных обогатительных установок : монография / А. И. Матвеев, Ф. М. Федоров, В. Р. Ларионов ; отв. редактор С. А. Батугин. – Якутск : ЯФ Изд-ва СО РАН, 2002. – 354 с.
118. Матвеев, А. И. Разработка модульных установок – новое направление в технологии переработки и обогащения золотосодержащих руд / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Е. Филиппов, В. П. Винокуров // Наука и техника в Якутии. – 2002. – №1(2). – С. 21 – 24.
119. Патент № 2281809 Российская Федерация, МПК В03В 7/00, С22В 11/00 (2006.01) Рудообогатительный передвижной модульный комплекс : № 2004125313/02 : заявл. 18.08.2004 : опубл.20.08.2006 / Матвеев А. И., Григорьев А. Н., Федоров Ф. М., Лебедев И. Ф., Львов Е. С. ; заявитель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН // Бюл. № 23. – Ч.1. – С. 200.
120. Матвеев, А. И. Возможности освоения небольших месторождений и рудопроявлений золота с использованием нового класса рудообогатительной

- установки / А. И. Матвеев, В. Е. Филиппов, А. Н. Григорьев, А. М. Гладышев // Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса Республики Саха (Якутия) в современных условиях : материалы Республиканской научно- производственной геологической конференции, г. Якутск, 16-18 октября 2001 г. – Якутск : [Изд-во] Госкомгеологии РС (Я), 2002. – С. 45 – 48.
121. Матвеев, А. И. Модульный принцип построения технологических схем обогащения при малообъемной переработке руд с использованием передвижных модульных установок / А. И. Матвеев, Ф. М. Федоров // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья : Международная научно техническая конференция, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2003. – С. 19 – 23.
122. Матвеев, А. И. Разработка модульных установок – новое направление в технологии переработки и обогащения золотосодержащих руд / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Е. Филиппов, В. П. Винокуров // Наука и техника в Якутии : сборник научных статей ; отв. редактор В. В. Шепелев. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2007. – С. 50 – 53.
123. Матвеев, А. И. Рудообогатительная установка по освоению золоторудных месторождений с сухой технологией в условиях Северо-Востока страны / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Е. Филиппов // Золото северного обрамления Пацифика : Тезисы докладов II Международного горно-геологического форума, посвященного 110-летию со дня рождения Ю.А. Билибина, г. Магадан, 02-05 сентября 2011 г. – Магадан : Северо-Вост. компл. науч.– исслед. ин-т ДВО РАН, 2011. – С. 255.
124. Патент № 2185889 Российская Федерация, МПК 7 В03, В 9/00, 7/00. Рудообогатительный передвижной модульный комплекс : № 2000113147/03 : заявл. 26.05.2000 : опубл. 27.07.2002 / Матвеев А. И., Гладышев А. М., Григорьев А. Н. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН // Изобретения. Полезные модели – 2002. – № 21.

125. Патент № 2370327 Российская Федерация, МПК В07В 9/100, В 03В 7/00 (2006.01). Рудообоганительный передвижной модульный комплекс : № 2007146815/03 : заявл. 27.06.2009 : опубл. 20.10.2009 / Матвеев А. И., Филиппов В. Е., Осипов Д. А., Григорьев А. Н., Гаврильев Д. М., Лебедев И. Ф. ; заявитель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН // Бюл. № 29 – С. 635.
126. Винокуров, В. Р. Применение мельницы сухого многократного ударного действия при измельчении золотосодержащих руд месторождения "Малый Тарын" / В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12-1. – С. 48 – 58.
127. Матвеев, А. И. Возможности адаптации процессов рудоподготовки к созданию мобильных обоганительных установок (МПРОУ) / А. И. Матвеев, Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Пути решения актуальных проблем и переработки полезных ископаемых Южной Якутии : Тезисы докладов II Республиканской научно-практической конференции, г. Нерюнгри, 19-21 октября 2004 г. – Якутск : Изд-во ЯГУ, 2004. – С. 49 – 50.
128. Патент № 2460100 Российская Федерация, МПК В07В 9/00 (2006.01). Способ сухого обогащения на рудообоганительном передвижном модульном комплексе : № 2010123095/03 : заявл. 07.06.2010 : опубл. 20.07.2012 / Матвеев А. И., Винокуров В. Р., Львов Е. С. // Бюл. № 20. – С. 138.
129. Винокуров, В. Р. Эффективность использования центробежной мельницы ЦМВУ-800 в технологических схемах сухой рудоподготовки / В. Р. Винокуров // Наука и инновационные разработки – Северу : материалы II Международной научно - практической конференции, г. Мирный, 14-15 марта 2019 г. – Мирный, 2019. – С. 182 – 185.
130. Федосеев, С. М. Доводка концентратов на шлюзе с магнитной системой / С. М. Федосеев, В. Р. Ларионов, Е. С. Слепцова, И. Ф. Лебедев, В. Р. Винокуров // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного

- сырья : Международная научно техническая конференция, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2003. – С. 214 – 217.
131. Матвеев, А. И. Результаты испытания пневмосепаратора ПОС-2000 / А. И. Матвеев, И. Ф. Лебедев, В. Е. Филиппов, А. Н. Григорьев, В. Р. Винокуров // Научные основы и практика разведки и переработки руд и техногенного сырья : Международная научно техническая конференция, г. Екатеринбург, 18-21 июня 2003 г. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2003. – С. 140 – 144.
132. Матвеев, А. И. Исследование на обогатимость продуктов измельчения упорных руд в центробежном измельчителе / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. – С. 376 – 377.
133. Филиппов, В. Е. Характер деформации частиц золота в дробильно-измельчительных агрегатах различных систем / В. Е. Филиппов, Е. С. Львов, В. Р. Винокуров // Экологические проблемы и новые технологии комплексной переработки минерального сырья (Плаксинские чтения) : материалы Международного совещания, г. Чита, 16-19 сентября 2002 г. – Чита : Изд-во ПКЦ «Альтекс», 2002. – Ч. 4. – С. 3 – 8.
134. Львов, Е. С. Деформация частиц золота в различных системах дробильно-измельчительного оборудования / Е. С. Львов, В. Е. Филиппов, В. Р. Винокуров // Материалы научной конференции молодых ученых и аспирантов, посвященный 370-летию г. Якутска (Науки о Земле). – Якутск : Изд-во ЯГУ, 2002. – С. 96 – 100.
135. Зашихин, А. В. О влиянии эффекта ударной изометризации на частицы золота / А. В. Зашихин // Обогащение руд. – 2021. – № 4. – С. 10 – 14. – DOI: 10.17580/or.2021.04.02.
136. Осипов, Д. А. Изменение технологических свойств золота в процессе помола в барабанной шаровой мельнице / Д. А. Осипов // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке : материалы

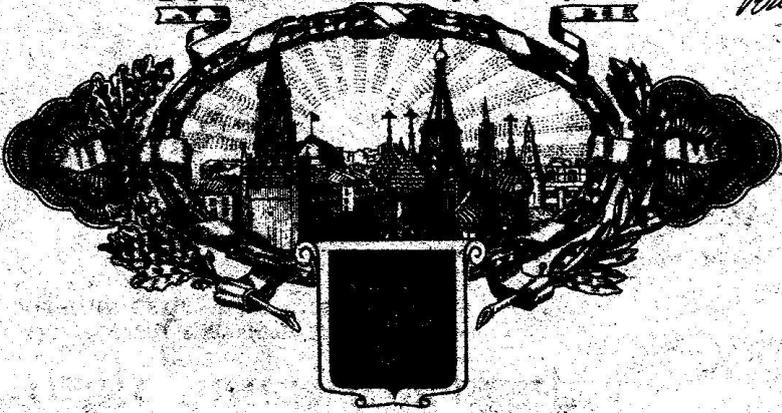
- Международной конференции (Плаксинские чтения), г. Иркутск, 09-14 сентября 2019 г. – Иркутск, 2019. – С. 95 – 98.
137. Осипов Д. А. Экспериментальное изучение деформации ковких частиц в центробежной мельнице ЦМВУ-800 / Д. А. Осипов, В. Е. Филиппов, А. И. Матвеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 10. – С. 232 – 237.
138. Матвеев, А. И. Сравнительные испытания измельчения руд Сентачанского месторождения в центробежном измельчителе ЦМВУ-800 и в шаровой мельнице мокрого измельчения / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 12. – С. 293 – 295.
139. Матвеев, А. И. Сравнительные испытания измельчения руд Сентачанского месторождения в центробежном измельчителе ЦМВУ-800 и в шаровой мельнице мокрого измельчения / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S15. – С. 117-120.
140. Матвеев, А. И. Исследования пылеобразования и разработка рекомендаций по пылеподавлению при работе центробежной мельницы ЦМВУ-800 / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 32 – 35.
141. Винокуров, В. Р. Применение центробежной мельницы ЦМВУ-800 в условиях Крайнего Севера / В. Р. Винокуров // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы XXIV Международной научно-технической конференции, г. Екатеринбург, 09-12 апреля 2019 г. – Екатеринбург. 2019. – С. 165 – 170.
142. Винокуров, В. Р. Эффективность применения центробежной мельницы ЦМВУ-800 в условиях холодного климата / В. Р. Винокуров // Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата, г. Якутск, 03-07 июля 2018 г. – Якутск : Цумори Пресс, 2018. – Т. 2. – С. 456 – 464.

143. Матвеев, А. И. Исследования работы центробежной мельницы многократного ударного действия ЦМБУ-800 при отрицательных температурах / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // VIII Конгресс обогатителей стран СНГ : сборник материалов. – М., 2011. – Т. 1. – С. 299 – 302.
144. Матвеев, А. И. Изучение эффективности работы центробежной мельницы многократного ударного действия при отрицательных температурах / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 10. – С. 256 – 258.
145. Матвеев, А. И. Резервы ударных методов дезинтеграции для глубокого раскрытия свободного золота из руд / А. И. Матвеев, А. Н. Григорьев, В. Р. Винокуров, Е.С. Львов // Новые технологии добычи и переработки природного сырья в условиях экологических ограничений : материалы Всероссийской научно-технической конференции с Международным участием, г. Улан-Удэ, 26-30 июля 2004 г. – Улан-Удэ : Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2004. – С. 44 – 46.
146. Винокуров, В. Р. К вопросу энергетической эффективности центробежной ступенчатой мельницы ЦМБУ-800 / В. Р. Винокуров // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России : Труды третьей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-кор. РАН Новопашина М.Д., г. Якутск, 16-19 июня 2015 г. – Якутск : Изд-во СМИК-Мастер. Полиграфия, 2015. – С. 69 – 72.
147. Федосеев, С.М. Оценка энергетической эффективности измельчителя ЦМБУ-800 / С. М. Федосеев, А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – Вып. 3: Региональное приложение Якутия. – С. 244 – 248.
148. Винокуров, В. Р. Расчет энергетической эффективности центробежной мельницы ЦМБУ-800 / В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12, Ч. 6. – С. 1103 – 1106.

149. Патент № 2322299 Российская Федерация, МПК В02С 13/00 (2006.01).
Центробежный аппарат дезинтеграции : № 2006106684/03 : заявл. 03.03.2006 :
опубл. 20.04.2008 / Матвеев А. И., Григорьев А. Н. ; заявитель Институт
горного дела Севера им. Н.В. Черского ССО РАН // Бюл. № 11.
150. Патент № 2746502 Российская Федерация, МПК В02С 7/00 (2021.01.).
Вертикальный центробежный измельчитель : № 2020119813 : заявл. 08.06.2020
: опубл. 14.04.2021 / Матвеев А. И., Винокуров В. Р., Григорьев А. Н. ;
заявитель ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук» // Бюл. № 11.
151. Винокуров, В. Р. Способ многократного ударного действия в измельчении /В.
Р. Винокуров, А. И. Матвеев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы
Северо- Востока России : материалы IX Всероссийской научно- практической
конференции, г. Якутск, 10-12 апреля 2019 г. – Якутск, 2019. – Т. 2. – С. 241 –
245.
152. Матвеев, А. И. Разработка конструкции нового измельчителя горных пород
комбинированного действия / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров / Природные
ресурсы Арктики и Субарктики. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 63 – 73.
153. Матвеев, А. И. Научно-экспериментальные основы сухого обогащения руд
полезных ископаемых / А. И. Матвеев, И. Ф. Лебедев, В. Р. Винокуров, Е. С.
Львов // Записки Горного института. – 2022. –Т. 256. – С. 613 – 622. – DOI:
10.31897/PMI.2022.90.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

Лоб ОИ
Винников ВР



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2209668

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ МЕЛЬНИЦА САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Патентообладатель(и):
Институт горного дела Сибирь СО РАН

по заявке № 2001113588, дата поступления: 18.05.2001

Приоритет от 18.05.2001

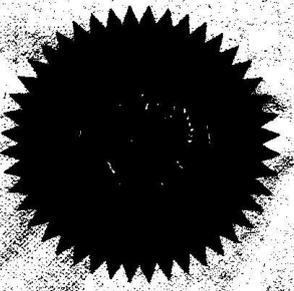
Автор(ы) изобретения:
см. на обороте

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с 18 мая 2001 г. при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 10 августа 2003 г.

Генеральный директор
А.В. Корнилов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2198028

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ

Патентообладатель(ли):

Институт горного дела Севера СО РАН

по заявке № 2001101030, дата поступления: 11.01.2001

Приоритет от 11.01.2001

Автор(ы) изобретения:

*Матвеев Андрей Иннокентьевич,
Григорьев Анатолий Никифорович,
Винокуров Василий Романович*

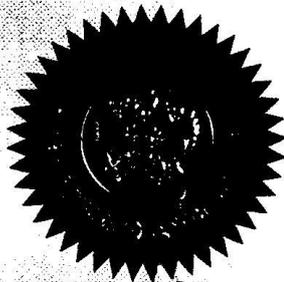
Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с 11 января 2001 г. при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 10 февраля 2003 г.

Генеральный директор

А.Д. Корчагин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2416463

ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ С КОЛЬЦЕВЫМИ
ОТБОЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Патентообладатель(ли): *Институт горного дела Севера им.
Н.В.Черского Сибирского отделения Российской академии
наук (RU)*

Автор(ы): *Матвеев Андрей Иннокентьевич (RU), Винокуров
Василий Романович (RU)*

Заявка № 2009122706

Приоритет изобретения 15 июня 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 20 апреля 2011 г.

Срок действия патента истекает 15 июня 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2281809

**РУДОБОГАТИТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕДВИЖНОЙ
МОДУЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС**Патентообладатель(ли): *Институт горного дела Севера им. Н.В.
Черского СО РАН (RU)*Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2004125313

Приоритет изобретения 18 августа 2004 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 20 августа 2006 г.

Срок действия патента истекает 18 августа 2024 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*

Б.И. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2365411

ЩЕКОВАЯ ДРОБИЛКА

Патентообладатель(ли): *Институт горного дела Севера им.
Н.В.Черского СО РАН (RU)*

Автор(ы): *Матвеев Андрей Иннокентьевич (RU), Осипов
Дьулустан Акимович (RU), Винокуров Василий Романович
(RU)*

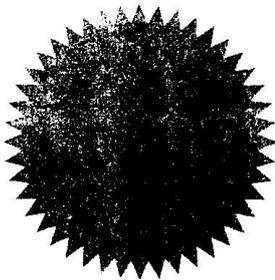
Заявка № 2007146814

Приоритет изобретения 17 декабря 2007 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 27 августа 2009 г.

Срок действия патента истекает 17 декабря 2027 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2456100

**СПОСОБ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ НА
РУДООБОГАТИТЕЛЬНОМ ПЕРЕДВИЖНОМ
МОДУЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ**

Патентообладатель(ли): *Учреждение Российской академии наук
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского
отделения РАН (RU)*

Автор(ы): *Матвеев Андрей Иннокентьевич (RU), Винокуров
Василий Романович (RU), Львов Евгений Степанович (RU)*

Заявка № 2010123095

Приоритет изобретения 07 июня 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 20 июля 2012 г.

Срок действия патента истекает 07 июня 2030 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2746502

Вертикальный центробежный измельчитель

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Матвеев Андрей Иннокентьевич (RU), Винокуров Василий Романович (RU), Григорьев Анатолий Никифорович (RU)*

Заявка № 2020119813

Приоритет изобретения **08 июня 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **14 апреля 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **08 июня 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ильин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 94168

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ МЕЛЬНИЦА

Патентообладатель(ли): *Институт горного дела Севера им.
Н.В.Черского СО РАН (RU)*

Автор(ы): *Матвеев Андрей Иннокентьевич (RU), Винокуров
Василий Романович (RU)*

Заявка № 2008125581

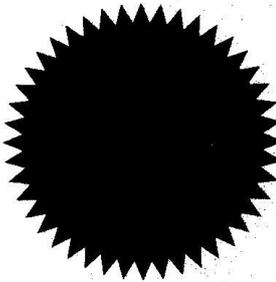
Приоритет полезной модели 23 июня 2008 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 мая 2010 г.

Срок действия патента истекает 23 июня 2018 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов





УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИГДС СО РАН

Д.т.н., проф.

2002 г.

Новопашин М.Д.

УТВЕРЖДАЮ:

Председатель ООО

«С/а Надежда»

2002г.

Раух В.Р.

АКТ

О результатах полевых работ по договору № Ф-02-04

«О результатах опытно-промышленных испытаний нового оборудования мобильной рудообогатительной установки (МПРОУ) в процессе поисково-разведочных работ и опытно-промышленной отработки рудопроявления «Одолго»

25.11.02.

г. Тында

Нами, главным инженером ООО «С/а Надежда» Самохваловым Г.П., ведущим геологом Габышевым В.Д., м.н.с. лаб. ОПИ ИГДС, командиром полевого отряда «Руда», Лебедевым И.Ф., составлен настоящий акт о результатах опытно-промышленных испытаний по договору № Ф-02-04. После проведения аналитических работ по определению вещественного состава и качества продуктов переработки рудных образцов рудных тел 5, 7, 11 с использованием нового оборудования модульной рудообогатительной установки: дробилки комбинированного ударного воздействия ДКД-300, центробежного измельчителя ЦМВУ-800 и пневмосепаратора ПОС-2000 получены основные результаты исследований, которые заключаются в следующем:

- при дроблении рудных образцов (исходная крупность -100+5 мм) на ДКД-300 получены усредненные гранулометрические характеристики продуктов дробления с преобладанием доли мелких фракций -0,63 мм 55,5%.

- при измельчении руды классами крупности -20+5 мм, и -5 мм центробежной мельницей ЦМВУ-800 установлено, что основная масса измельченного материала находится в классе крупности -0,63+0,315 мм и составляет 28-32%, эффективность измельчения исходных крупных классов -20+5 мм существенно выше чем для классов -5 мм., при этом степень измельчения составляет: для класса крупности -5 мм - 7,7; для класса крупности -20+5 - 13,2.

- при переработке тонкоизмельченных материалов на пневмосепараторе ПОС-2000 достигается степень сокращения в 16 раз, при этом содержание золота в хвостах (хвостовых патрубках пневмосепаратора) находится на уровне 0,63 г/т при исходном содержании золота 4,97 г/т, достигнут уровень извлечения - 88,08%.

Анализ гранулометрического состава извлеченного золота проводился камеральной лабораторией ООО «Надежда». Пробирный проводился в ФХЛ ГГГП «Алдангеология». Атомно-адсорбционный анализ продуктов обогащения на содержание золота и серебра, проводился аналитической испытательной лабораторией ЗАО НПП «ОКА» (с. Первомайское Тындинского района Амурской области).

В целом полученные технологические результаты испытаний по эффективности практически соответствуют мокрым методам переработки и показывают возможность применения сухой технологии в регионах с засушливым климатом, где другой альтернативной технологии по рудоподготовке и переработке золотосодержащих руд не имеется.

Главный инженер ООО «С/а Надежда»
Вед. Геолог ООО «С/а Надежда»
м.н.с., ОПИ ИГДС СО РАН
командир полевого отряда

Самохвалов Г.П.
Габышев В.Д.
И. Лебедев

Самохвалов Г.П.
Габышев В.Д.
Лебедев И.Ф.