

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»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Якутск – 2023

Работа выполнена в Институте горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГДС СО РАН)

Научный руководитель **Матвеев Андрей Иннокентьевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ИГДС СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории обогащения

Официальные оппоненты: **Лагунова Юлия Андреевна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», заведующий кафедрой горных машин и комплексов
Овчинников Николай Петрович, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», директор Горного института

Ведущая организация ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.234.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 677980, Республика Саха (Якутия) г. Якутск, проспект Ленина, д. 43. Тел/факс: 8(4112)33-59-30, e-mail: igds@ysn.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ЯНЦ СО РАН <https://prez.ysn.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук



Зубков Владимир Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Процесс измельчения является самым энергоемким на горно-обогатительном 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 измельчители 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.

Повышение эффективности измельчения возможно в центробежных мельницах 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. Протодяконов, 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, изложенных в диссертации, подтверждается корректностью постановки задач, решением их с использованием современных методов исследований, достаточным объемом экспериментальных исследований, сходимостью расчетных данных с показателями, полученными при реализации в опытно-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 крупно-объемных проб рудных 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. 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), 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 155 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены общие теоретические представления процессов разрушения рудных материалов. Рассмотрены процессы разрушения рудных материалов «свободным ударом». Выполнен анализ существующих аппаратов дробления и измельчения с ударным принципом работы. Дана оценка преимуществ и недостатков существующих ударных мельниц. Выявлена необходимость перехода к многократным динамическим воздействиям для повышения эффективности измельчения.

Во второй главе приведены конструктивные особенности разработанных центробежных мельниц многократного ударного действия. Приведены методики исследований на лабораторных центробежных мельницах многократного ударного действия с разной конструкцией рабочих органов (ступенчатой, дисковой, конусной). Даны результаты экспериментальных исследований и сравнительный анализ эффективности измельчения рудных материалов в лабораторных моделях разработанных мельниц. Показано влияние числа ступеней на эффективность измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице. Определена взаимосвязь окружной скорости вращения рабочих органов с эффективностью измельчения. Установлено, что наиболее

высокий эффект измельчения происходит в центробежной мельнице со ступенчатыми рабочими органами.

В третьей главе рассмотрены методы и лабораторные стендовые установки по изучению процессов разрушения. Выявлены основные недостатки существующих методик по разрушению образцов рудного материала в условиях интенсивных многократных динамических воздействий и обоснована необходимость разработки методики расчета, позволяющей определять рациональные параметры предложенных авторских центробежных мельниц и прогнозировать гранулометрический состав продуктов измельчения при заданных значениях физико-механических свойств исходного материала, таких как крупность и крепость. Приведены результаты исследований по разрушению рудных материалов на авторском стенде по разрушению частиц разной крупности и крепости. На основе экспериментальных и натурных данных установлены критические скорости столкновения частиц с поверхностью рабочих органов, приводящих к разрушению частиц разной крупности и крепости по шкале М. М. Протодьяконова. Разработана методика расчета рабочих параметров работы центробежных мельниц многократного ударного действия. Приведены результаты экспериментальных исследований по интенсификации процессов измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице, за счет определения рациональных параметров рабочей камеры и установки дополнительных отбойных элементов.

В четвертой главе приведены результаты испытаний опытно-промышленного образца центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800. Показаны результаты экспериментальных и полевых испытаний на месторождениях Одолго и Задержнинское. Выполнена оценка энергетической эффективности разработанной мельницы. Приведены результаты исследований работы ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 при отрицательных температурах. Даны рекомендации по пылеподавлению при работе мельницы. Представлены результаты исследований на модели вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН.

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.

В лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН с участием автора разработаны конструкции нескольких измельчительных аппаратов (рисунок 1), основанных на многократном динамическом

воздействии с разной конструкцией рабочих органов (ступенчатой, конусной и дисковой), изобретения защищены патентами РФ.

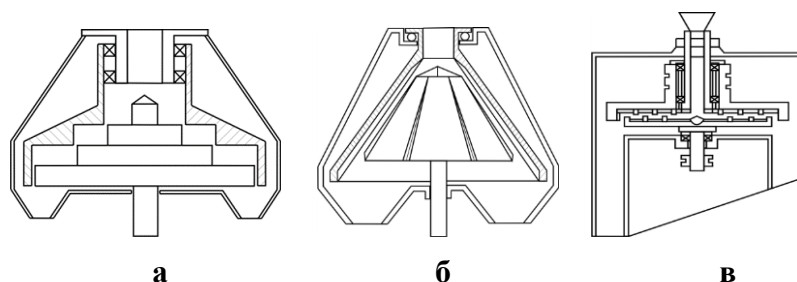


Рисунок 1 – Принципиальные конструкции центробежных мельниц: а) со ступенчатыми; б) с конусными; в) с дисковыми рабочими органами

Сравнительными экспериментальными исследованиями по измельчению рудных материалов центробежными мельницами со ступенчатым, дисковым и конусным активаторами установлено, что наилучшие условия сообщения

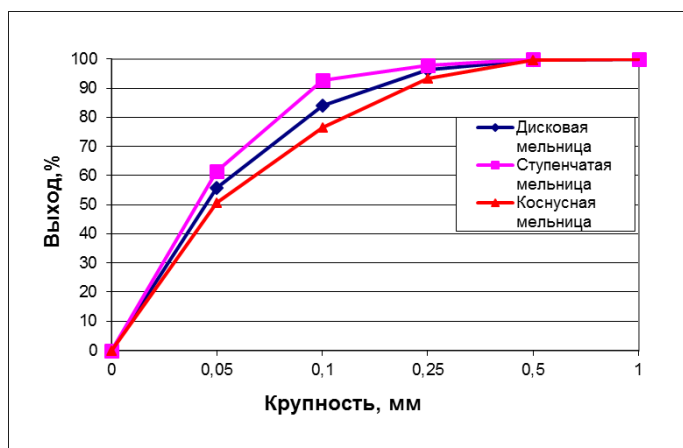


Рисунок 2- Сравнительные кумулятивные гранулометрические характеристики продуктов дезинтеграции в мельницах с разными рабочими органами

ударных импульсов частицам для достижения высоких результатов их измельчения достигаются при ступенчатой форме активатора. Результаты измельчения оловянного концентрата с исходной крупностью $-2,5+1$ мм в опытных лабораторных мельницах со ступенчатым, дисковым, и конусным рабочими органами с одинаковым диаметром 250 мм, при одних и тех же значениях скоростей вращения

верхнего и нижнего рабочих органов (рисунок 2) показывают, что по выходу контрольного класса крупности 0,1 мм наиболее высокий показатель у ступенчатой мельницы по сравнению с дисковой и конусной мельницами, и достигает 90 %.

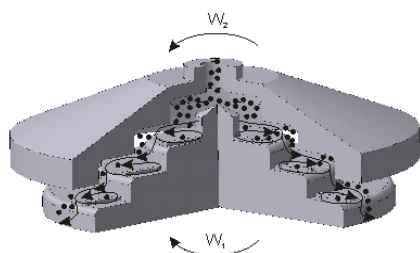


Рисунок 3 - Рабочая камера центробежной ступенчатой мельницы

Ступенчатая форма рабочих органов (рисунок 3) позволяет придавать измельчаемым частицам необходимый уровень возрастающего импульса по мере перемещения их в рабочей камере мельницы к периферийной разгрузке, а также организовать рациональные условия самоизмельчения при циркулировании частиц на уровне каждой ступени. В

ходе экспериментальных исследований на лабораторной мельнице со

ступенчатым активатором с разным количеством ступеней (от 1 до 4 ступеней) было установлено, что наиболее высокий показатель эффективности измельчения оказался у трёхступенчатого варианта центробежного активатора, при скорости вращения верхнего рабочего органа 2000 об/мин и нижнего 5000 об/мин. В таблице 1 приведены скорости частиц в трехступенчатой лабораторной центробежной ступенчатой мельнице.

Таблица 1 – Скорости столкновения частиц в лабораторной центробежной мельнице

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



Рисунок 4 - Центробежная мельница встречного удара

После определения рациональных технологических и конструктивных параметров лабораторной модели (окружной скорости вращения и радиусов рабочих органов) был изготовлен опытно-промышленный образец центробежной ступенчатой мельницы ЦМВУ-800. Общий вид мельницы представлен на рисунке 4, техническая характеристика приведена в таблице 2. Во время натурных полевых испытаний опытно-промышленного образца

ступенчатой мельницы ЦМВУ-800 показал высокую эффективность разрушения рудных материалов, что зависит от степени загруженности мельницы. При этом установлено, что максимальный выход контрольного класса -0,1 мм, происходит при производительности 4,5 т/ч (рисунок 5).

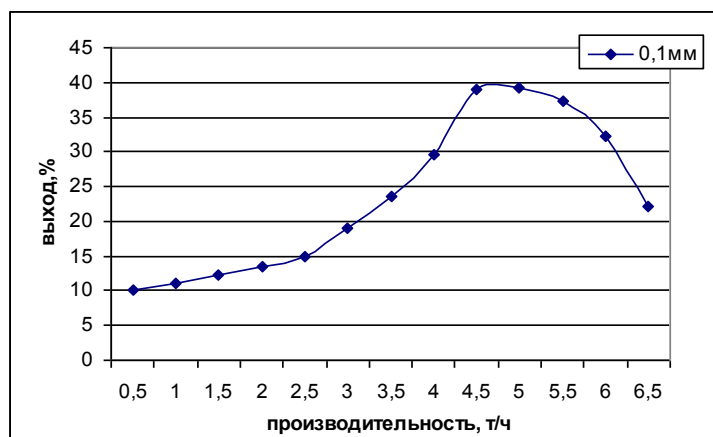


Рисунок 5 - Гранулометрическая характеристика продуктов измельчения при разной производительности мельницы ЦМВУ-800

В сравнении с существующими аналогами ЦМВУ-800 имеет существенные преимущества по энергоемкости, металлоемкости и по эффективности измельчения (табл.2).

Таблица 2 – Технические характеристики центробежных установок

Параметры	Трибокнетика 3050	Титан М-63	Титан М-125	Varmac B3100SE VSI	ДЦ-0,4	ЦМБУ-800
Производительность, т/ч	1-4,5	1-3	3-10	3-20	1-10	1-6
Крупность питания, мм	до 20	до 30	до 40	до 20	до 15	до 15
Крупность продукта, мм	0,063-1,25 0,01-0,063	0,04 — 0,3	0,05-0,5	0,01-2	н.д.	0,05-1
Мощность, кВт	60,2	110	205	11-15	18	7
Габаритные размеры, м: длина x ширина x высота	5,8x5,4x3,8	5,5x3,0x 7,6	7,6x4,2x15,3	1,4x0,9x1,2	1,9x1,4x1, 8	1,4x1,3x1,2
Масса, т	3,9	8	12	1,2	1,193	0,9

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.

Основным фактором в работе центробежных ударных мельниц является скорость столкновения разрушаемых частиц с рабочими органами, при этом каждые частицы в зависимости от крепости и крупности имеют свою критическую скорость в момент удара, при которой они разрушаются.

Для выявления закономерностей разрушения рудных частиц разной крупности и крепости от скорости столкновения с неподвижной броней, были проведены испытания на лабораторном экспериментальном стенде с центробежным активатором и неподвижной отражающей стенкой.

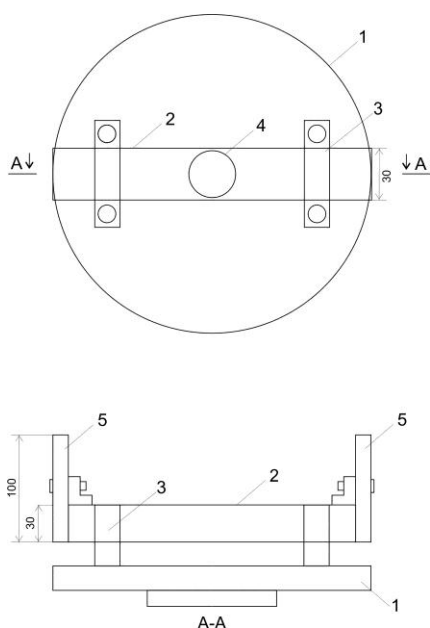


Рисунок 6 - Схема лабораторного стенда с центробежным активатором

Экспериментальный стенд (рисунок 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.

Стенд позволяет придать инерцию частице и выпускать её из трубчатого активатора при заданной скорости вращения, частица под действием центробежной силы выбрасывается из трубчатого активатора и испытывает удар о неподвижную броню. Испытания проводились по следующей методике.

Частота вращения центробежного активатора составляла 1000 - 8000 об/мин; для проведения экспериментальных

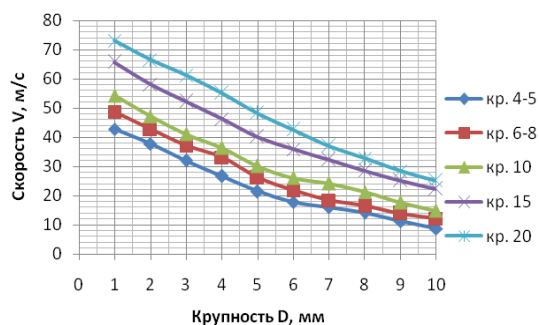


Рисунок 7 - Диаграммы разрушения частиц разной крупности и крепости от скорости столкновения

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 22 мм. Замеры частоты вращения ротора и напряжения производились в режиме реального времени. После каждого эксперимента определялась степень сокращения геометрических размеров рудной

частицы после столкновения с неподвижной стенкой.

Скорость вылета частицы вычислялась по формуле: $W = (2\pi nR) / 60$, м/с, где n – частота, об/мин; R - радиус рабочего органа, м.

В таблице 3 приведены полученные критические скорости столкновения частиц (м/с) разной крупности и крепости на центробежном стенде, приводящие к разрушению частиц.

Таблица 3 – 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 7). В таблице 4 представлены логарифмы скорости частиц от их крупности. Из таблицы 4 видно, что коэффициенты корреляции для разных значений крепости близки к единице, это нам позволяет сделать вывод о линейной зависимости логарифма скорости от крупности частиц.

Для удобства дальнейших расчетов по определению необходимой скорости столкновения для разрушения частиц разной крупности и крепости о неподвижную броню, данная таблица с помощью макроса на языке VBAExcel была сведена к функции двух переменных (крепости и крупности).

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

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

Таблица 4 – Логарифмы скорости движения частиц от их крупности

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

Поле для ввода исходных данных в программе выглядит следующим образом (таблица 5). В данном случае моделировался процесс последовательного разрушения частицы разной крепости и крупности: от 10 мм до 1 мм.

Таблица 5 – Общий вид поля для ввода исходных данных

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

Как видно из таблицы 5, например, для сокращения крупности более, чем в два раза частицы крупностью 4 мм и крепостью $f=6$ необходимо обеспечить скорость столкновения частицы 34,63 м/с, а для ее дальнейшего разрушения до 0,5 мм необходимо обеспечить скорости столкновения частицы по ступеням: 34,6 м/с; 42,8 м/с; 48,8 м/с. Результат моделирования может быть использован для расчета рабочих параметров работы рудоразмольных аппаратов. Далее были проведены численные расчеты скорости столкновения разрушаемой частицы на примере лабораторной модели трехступенчатой мельницы. В конструкции мельницы с двумя противоположно вращающимися верхним и нижним рабочими органами важно определить скорость столкновения частиц с поверхностью рабочих органов, при их разной частоте вращения. Расчеты скорости столкновения частиц с рабочими органами центробежной ступенчатой мельницы многократного действия были произведены с учетом геометрических размеров рабочих органов лабораторной модели и режимных параметров рабочих органов (скорости вращения), которые подтвердились высокой сходимостью с экспериментальными данными полученными на лабораторном стенде с центробежным активатором, по аналогии с методикой В.С. Францкевича с уточнениями.

Для описания движения твердой частицы по вращающемуся диску пригодно уравнение динамики несвободной материальной точки:

$$m\bar{a} = \sum \bar{F}_i + \bar{N}, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг; a – абсолютное ускорение частицы, м/с²; F_i – активные силы, действующие на частицу; N – нормальная реакция.

Скорость движения частицы по диску рассматривается как состоящая из переносной и относительной скоростей.

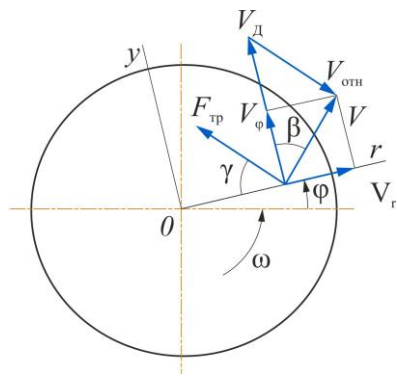


Рисунок 8 - Расчетная схема движения частицы по вращающемуся диску

За определяющий параметр принимается суммарная скорость движения частицы по диску V . В системе координат Oyr переносное движение – это поворот системы координат на угол φ со скоростью V_φ , а относительное – движение частицы вдоль оси r со скоростью V_r (рисунок 8). На рисунке 9 приведены начальные данные необходимые для расчетов определения скорости вылета разрушаемой частицы в трехступенчатом варианте мельницы, при разной частоте оборотов рабочих органов (верхнего и нижнего) с

радиусом ниж. раб. органа (0,05 м; 0,07 м; 0,09 м) с использованием программы MathCAD.

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	$vc\varphi0 := 0$ 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
	$vc\varphi0 := 0$ начальная тангенциальная скорость частицы

$\omega := \pi \cdot \frac{n}{30}$ угловая скорость $x2 := \frac{9.4}{n}$ 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
	$vc\varphi0 := 0$ начальная тангенциальная скорость частицы

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

Рисунок 9 – Начальные данные для расчетов определения скорости столкновения разрушаемой частицы в трехступенчатом варианте мельницы, при разной частоте оборотов рабочих органов (верхнего нижнего) с радиусом нижнего раб. органа (0,05 м; 0,07 м; 0,09 м)

Алгоритм решения задачи в пакете MathCad выглядит следующим образом (рисунок 10).

Результаты расчётов соответствуют значению таблицы 1, при заданной частоте оборотов верхнего рабочего органа 2000 об/мин и 5000 об/мин нижнего, что

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

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

Рисунок 10 – Результаты расчетов скорости столкновения частицы в трехступенчатом варианте мельницы

является наиболее рациональным соотношением (1:2,5), что подтверждается экспериментальными данными. При этом скорость столкновения на первой ступени составила 51,039 м/с; на второй – 62,821 м/с; на третьей – 78,397 м/с. Соблюдение таких скоростей столкновения частиц (достаточно для измельчения частиц высокой крепости пород (крепостью f-15 по шкале Протодяконова) исходной крупности 4 мм с выходом измельчённого продукта размером 0,5 мм.

В таблицах 7 и 8 приведены расчеты скоростей столкновения необходимых для разрушения частиц крепких пород (крепостью f -10 по шкале Протодяконова) и для разрушения частиц средней крепости (крепостью f -4 по шкале Протодяконова).

Таблица 7 - Расчет скорости столкновения частицы в лабораторной ступенчатой 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	0,06	40,071
2	0,07	0,08	49,358
3	0,09	0,1	61,567

Таблица 8 — Расчет скорости столкновения частицы в лабораторной ступенчатой 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

Полученные результаты приведены с учетом статистических критериев воспроизводимости измерений, при этом наблюдается сходимость с расчетными данными по разработанной методике.

В результате получены уточнённые значения скоростей столкновения разрушаемых частиц в ступенчатой мельнице, возрастающих от 1 до 3 ступени, что очень важно для управления процессами разрушения частиц разной крупности и крепости, а также для обоснования конструктивных параметров рабочих органов мельницы.

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 Протодяконова.
3. Разработана методика расчета необходимой критической скорости столкновения для разрушения частиц крупностью от 1 до 10 мм разной крепости по шкале Протодяконова 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 опытно-промышленного 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 (льдиистость) 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 ударного действия разного типоразмера и производительности, а также в уточнении уровня влияния аэродинамических потоков, образующихся в рабочей камере мельницы на эффективность измельчения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Винокуров, В. Р. Методика расчета оптимальных рабочих параметров рудоразмольного оборудования многоактного ударного действия / В. Р. Винокуров, А. И. Матвеев, С. М. Федосеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – Вып. 1: Региональное приложение Якутия. – С. 274 – 278.
2. Федосеев, С.М. Оценка энергетической эффективности измельчителя ЦМВУ-800 / С. М. Федосеев, А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров, // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – Вып. 3: Региональное приложение Якутия. – С. 244 – 248.
3. 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.
4. 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.
5. Винокуров В.Р. Испытания центробежных измельчителей с разной формой активаторов / В.Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. – Отдельный вып. 2: Якутия-1. – С. 193-196.
6. Матвеев, А. И. Конструктивные особенности центробежной мельницы ЦМВУ-80 / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 30 – 31.
7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Винокуров, В.Р. Разработка методики расчета рабочих параметров работы центробежных аппаратов измельчения многократного динамического воздействия / В. Р. Винокуров, А. И. Матвеев // Наука и образование. – 2012. – № 1. – С. 32 – 34.

11. Винокуров, В. Р. Расчет скорости движения разрушаемых частиц в центробежной ступенчатой мельнице / В. Р. Винокуров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 12. – С. 106 –108.

12. 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 26.07.23).

13. Винокуров, В. Р. Расчет энергетической эффективности центробежной мельницы ЦМВУ-800 / В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12, Ч. 6. – С. 1103 – 1106.

14. 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.

15. Винокуров, В. Р. Новые конструкции мельниц ударно-центробежного типа / В. Р. Винокуров, Е. С. Львов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12, Ч. 5. – С. 965 – 970.

16. 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.

Статьи в изданиях, индексируемых в системе Scopus и Web of Science

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. Матвеев А.И. Исследование особенностей дезинтеграции рудных материалов при сухом измельчении в центробежном аппарате новой конструкции / А. И. Матвеев, В. Р. Винокуров // ФТПРПИ. – 2023. – № 4 – С. 160 – 163. DOI: 10.15372/FTPRPI20230417.

Патенты

22. Патент на изобретение № 2209668 РФ, МПК В02С 17/02 (2000.01). Горизонтальная мельница самоизмельчения/ Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Злобин М.Н., Винокуров В.Р.; Заявка № 2001113588/03 от 18.05.2001; Оpubл. 10.08.2003, Бюл. № 22.

23. Патент на изобретение № 2198028 РФ, МПК В02С 13/20 (2000.01). Центробежный измельчитель/ Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Винокуров В.Р.; Заявка № 2001101030/03 от 11.01.2001; Оpubл. 10.02.2003, Бюл. № 4.

24. Патент на изобретение № 2416463 РФ, МПК В02С 13/00 (2006.01). Центробежный измельчитель с кольцевыми отбойными элементами / Матвеев А.И., Винокуров В.Р.; Заявка № 2009122706/21 от 15.06.2009; Оpubл. 20.04. 11, Бюл. №11.

25. Патент на полезную модель № 94168 РФ, МПК В02С 17/02 (2006.01). Горизонтальная мельница/ Матвеев А.И., Винокуров В.Р.; Заявка № 2008125581/22 от 23.06.2008; Оpubл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

26. Патент на изобретение № 2281809 РФ, МПК В03В 7/00 (2006.01) Рудообогатительный передвижной модульный комплекс/ Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Федоров Ф. М., Лебедев И.Ф., Винокуров В. Р., Львов Е.С.; Заявка №2004125313/02 от 18.08.2004; Оpubл. 20.08.2006. Бюлл. №23.

27. Патент на изобретение № 2365411 РФ, МПК В02С 1/04 (2006.01). Щековая дробилка/ Матвеев А.И., Осипов Д.А., Винокуров В.Р.; Заявка № 2007146814/03 от 17.12.2007; Опубликованно: 27.08.2009 Бюл. № 24.

28. Патент на изобретение № 2456100 РФ, МПК В07В 9/00 (2006.01). Способ сухого обогащения на рудообогатительном передвижном модульном комплексе/ Матвеев А.И., Винокуров В.Р., Львов Е.С.; Заявка № 2010123095/03 от 07.06.2010; Оpubл. 20.07.2012 Бюл. № 20.

29. Патент на изобретение № 2746502 РФ, СПК В02С 7/00 (2021.01). Вертикальный центробежный измельчитель/ Матвеев А. И., Винокуров В. Р., Григорьев А. Н.; заявитель и патентообладатель Учреждение Рос. акад. наук Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. - № 2020119813; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.04.2021 Бюл. № 11.