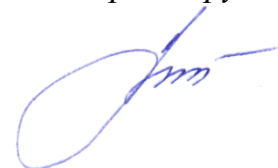


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Тверской государственный технический университет

На правах рукописи



Митусов Павел Евгеньевич

**Обоснование рациональных параметров измельчителя-классификатора
для грубого помола слабых горных пород**

2.8.8. – Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Горлов Игорь Васильевич

Тверь – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Общая информация.....	10
1.2 Обзор существующих теорий измельчения	11
1.3 Анализ современных способов измельчения горных пород	16
1.4 Анализ современных способов классификации горных пород.....	30
1.5 Анализ процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами	41
Выводы по главе 1.....	48
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ-КЛАССИФИКАТОРЕ	50
2.1 Разработка конструкции измельчителя-классификатора.....	50
2.2 Разработка теоретической модели процесса измельчения слабых горных пород в измельчителе-классификаторе.....	54
Выводы по главе 2.....	65
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ-КЛАССИФИКАТОРЕ.....	67
3.1 Разработка лабораторной установки для проведения эмпирических исследований процесса измельчения с помощью измельчителя-классификатора	67
3.2 Методика исследования	70
3.3 Исследование производительности установки по выходу готового продукта на основе метода ЦКРУП	74
3.4 Исследование влияния частоты вращения вала-измельчителя, частоты вращения перфорированного барабана и величины технологического зазора на объемную производительность по готовому продукту	80

3.5 Влияние фракционного состава и высоты столба поступающей на измельчение исходной породы на свойства готового продукта	84
3.6 Повышение эффективности процесса измельчения в измельчителе- классификаторе	88
Выводы по главе 3.....	91
4 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ.....	92
4.1 Технологическая схема производства сушеных бокситов	92
4.2 Технологическая схема производства порошков глины огнеупорной молотой.....	95
4.3 Методика определения рациональных параметров измельчительного оборудования.....	97
4.4 Технологическая схема на переработку отсева металлургического в железосодержащий продукт	99
4.5 Модернизация технологической схемы производства	100
4.6 Требования к железосодержащему продукту	101
4.7 Контроль качества продукта.....	102
Выводы по главе 4.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Расчётные данные проведённого исследования	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Патент на «Измельчитель-классификатор»	131
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Полезная модель «Пресс-классификатор».....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт внедрения ТОО «Завод Казогнеупор»	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Сертификат соответствия на железосодержащий продукт ...	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт внедрения ООО «Гермес»	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Протокол исследований железосодержащего продукта.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Сертификат участника конференции	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время особенностям измельчения и классификации пород слабой прочности, обладающих пластическими свойствами, таких как тальк, мел, гипс, слабые известняки и другие уделяется недостаточное внимание, как в России, так и за пределами нашей страны. В технологических схемах большинства предприятий используется типовое оборудование в виде конусных и валковых дробилок на стадиях среднего и мелкого дробления и шаровых барабанных мельниц для грубого и тонкого помола. Оборудование, спроектированное для решения широкого круга задач, использующее традиционные принципы воздействия на измельчаемый материал, такие как сжатие и удар, несет в себе высокую металлоёмкость, завышенные установленные мощности, рассчитанные на переработку широкого спектра горных пород и материалов, как по прочностным показателям, так и по структурным особенностям. Узкоспециализированное оборудование, рассчитанное на измельчение и классификацию пород слабой прочности, в Российской Федерации не выпускается.

При использовании традиционного оборудования для переработки слабых горных пород эффективность процессов измельчения и классификации уменьшается. Так, например, при переработке каолиновых глин и других пластичных горных пород в барабанных шаровых мельницах эффективность измельчения падает примерно на 40 %. Из практики, известно, что при измельчении прочных пород, таких как корунд и кварц (с твердостью по Моосу 9 и 7) энергопотребление в два раза ниже, чем при измельчении гипса и талька (с твердостью по Моосу 2 и 1, соответственно).

Анализ энергозатрат на процессы разрушения слабых горных пород показывает, что сдвигающие усилия представляются более эффективными. Так как их величина, необходимая для разрушения, существенно ниже усилий сжатия. Таким образом, разработка нового вида оборудования, позволяющего проводить процесс измельчения слабых пород с помощью комбинированного воздействия

сжимающих и сдвигающих усилий с одновременной классификацией, является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в разработку и исследование измельчительного оборудования для переработки горных пород внесли работы отечественных и зарубежных ученых: В. М. Авдохина, С. Е. Андреева, А. Д. Бардовского, В. А. Баумана, Л. А. Вайсберга, В. В. Зверевича, З. Б. Канторовича, В. В. Кармазина, Н. Г. Картавого, Б. В. Клушанцева, А. И. Косарева, В. А. Олевского, Р. А. Родина, М. Я. Сапожникова, Е. Е. Серго, П. М. Сиденко, В. П. Франчука, О. Е. Харо, M. Lindqvist, S. Morrell и многих других.

Основные работы в этом направлении посвящены анализу разрушения горных пород методами сжатия и изгиба. Использование этих методов обусловлено простотой конструктивного исполнения оборудования, работа которого сопряжена с повышенными энергетическими затратами. Поэтому возникает необходимость в разработке нового энергоэффективного измельчительного оборудования.

Цель работы заключается в повышении эффективности измельчения на стадии грубого помола слабых горных пород за счет обоснованного выбора рациональных параметров измельчителя-классификатора (агрегата) на основе анализа установленных закономерностей взаимодействия его рабочих органов с перерабатываемой горной породой.

Идея работы заключается в формировании комбинированных усилий со стороны рабочих органов измельчителя-классификатора в зоне разрушения с одновременной классификацией и отводом готового продукта, за счет чего повышается эффективность процесса переработки на стадии грубого помола слабых горных пород.

Задачи исследования:

– разработать принципиальную схему измельчителя-классификатора, позволяющего разрушать горные породы слабой прочности методом

комбинированного нагружения на основе разницы скоростей рабочих поверхностей агрегата с одновременным отводом готового продукта;

– разработать теоретическую модель процесса разрушения горной породы, обладающей пластическими свойствами, находящейся в рабочей зоне измельчителя-классификатора, с учетом влияния конструктивных особенностей агрегата и физико-механических свойств разрушаемой горной породы;

– установить зависимости производительности измельчения от конструктивных и режимных параметров измельчителя-классификатора, на основе анализа которых может быть достигнута максимальная эффективность переработки горных пород слабой прочности;

– разработать методику определения рациональных параметров измельчителя-классификатора с высокой производительностью и низкими энергетическими затратами при переработке горных пород слабой прочности, обладающих пластическими свойствами.

Научная новизна работы:

– на основе энергетического метода расчета контактного давления разработана теоретическая модель разрушения горной породы, обладающей пластическими свойствами, позволяющая определить рациональные параметры скоростей вращения рабочих органов и технологического зазора измельчителя-классификатора при измельчении слабых горных пород;

– получены аналитические зависимости контактного давления на рабочие поверхности агрегата от разницы тангенциальных скоростей барабана с перфорацией и вала-измельчителя, а также технологического зазора между ними;

– установлена зависимость производительности агрегата по подрешётному продукту при измельчении слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, от скорости вращения рабочих органов и технологического зазора между ними;

– установлена зависимость эффективности предлагаемого агрегата при измельчении слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, от скорости вращения рабочих органов и технологического зазора между ними,

причем наивысшая эффективность достигается при отношении тангенциальных скоростей вала-измельчителя и барабана с перфорацией около 3-х и технологическом зазоре, составляющем около 30 % от диаметра вала-измельчителя.

Методы исследования включают научный анализ и обобщение современных представлений теории разрушения горных пород; теоретическое исследование на базе математического моделирования процесса разрушения слабых горных пород; многофакторное экспериментальное исследование измельчения слабых горных пород с определением производительности и эффективности процесса в зависимости от различных параметров переработки с обработкой результатов методами математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическая модель процесса разрушения горной породы, обладающей пластическими свойствами, находящейся между вращающимися в одном направлении с разными тангенциальными скоростями перфорированным барабаном и установленным внутри него валом-измельчителем, которая учитывает конструктивные особенности агрегата и физико-механические свойства исходной горной породы, позволяющая определить рациональные параметры скоростей вращения рабочих органов и технологического зазора измельчителя-классификатора;

2. Зависимость производительности агрегата по подрешётному продукту от скорости вращения рабочих органов и технологического зазора;

3. Зависимость эффективности процесса измельчения с перманентной классификацией от исследованных параметров функционирования, показывающая, что эффективность процесса повышается более чем на 30 % при совпадении вектора суммарной скорости потока горной массы с вектором главного касательного напряжения, что обеспечивается разницей тангенциальных скоростей барабана с перфорацией и вала-измельчителя.

Достоверность результатов подтверждается теоретическими исследованиями в области разрушения горных пород с корректным

использованием математического анализа, метода дискретных элементов с учетом влияния физико-механических свойств разрушаемого материала и экспериментальными исследованиями влияния динамических и конструктивных параметров агрегата на эффективность процесса при достаточном количестве дублирующих опытов. Сходимость экспериментальных и теоретических зависимостей по критерию Стьюдента достигается при уровне значимости 0,1.

Практическая значимость работы:

- разработана конструкция измельчителя-классификатора, позволяющего разрушать горную породу методом комбинированного нагружения на основе использования разницы скоростей рабочих поверхностей с перманентным отводом готового продукта (патент РФ № RU 2531438 С2);
- разработана методика определения рациональных параметров измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород;
- определены рекомендации по использованию агрегатов, совмещающих процессы измельчения по принципу комбинированного воздействия сжимающих и сдвигающих усилий в зоне разрушения с перманентной классификацией при переработке слабых горных пород.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты и выводы диссертационной работы приняты к реализации: в виде методики определения рациональных параметров функционирования измельчительного и классифицирующего оборудования в Товариществе с ограниченной ответственностью «Завод Казогнеупор» (г. Рудный, Республика Казахстан) при переработке бокситов и огнеупорных глин; в виде методики определения рациональных параметров функционирования магнитного и классифицирующего оборудования при модернизации технологических схем производства железосодержащего продукта (отсева железосодержащего магнетитового) ООО «Гермес» (г. Таганрог).

Личный вклад автора состоит в: формулировании цели и задач исследования; проведении анализа использования оборудования для измельчения горных пород и разработке измельчителя-классификатора; разработке

теоретической модели, позволяющей установить рациональные параметры измельчителя-классификатора; разработке и создании лабораторной установки, проведении экспериментальных исследований и анализа результатов процесса измельчения слабых горных пород; разработке методики определения рациональных параметров измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (2011, 2012, 2013, 2022), научных семинарах кафедры «Теоретическая и прикладная механика» в 2012-2013 гг. (г. Москва, МГГУ), на Всероссийской научно-технической конференции «Инновационное развитие машиностроения и энергетики России» в 2022 г. (г. Тверь, ТвГТУ).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, из которых 1 входит в библиографическую и реферативную базу «Scopus», 3 работы – в изданиях, представленных в перечне, утвержденном ВАК при Минобрнауки России, 1 – в издании, входящем в перечень, утвержденный ВАК при Минобрнауки России, но не для научной специальности 2.8.8, 1 – патент РФ на полезную модель и 1 – патент РФ на изобретение.

Объём и структура работы. Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных литературных источников, состоящего из 152 наименования, изложенных на 138 страницах, включая 47 рисунков и 24 таблицы.

1 АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Общая информация

В настоящее время горная промышленность на этапе рудоподготовки использует различные по конструкции измельчительные агрегаты, которые обладают высокими энергозатратами. Это приводит к потреблению свыше 5 % всей ежегодно генерируемой электростанциями в мире электроэнергии на бесперебойное обеспечение работы такого оборудования. КПД машин для измельчения разного минерального сырья редко бывает выше 2 %. Следовательно, одной из основных задач разработчиков и исследователей данного направления рудоподготовки сегодня является минимизация расхода электроэнергии на процессы измельчения.

Наименьший фактический расход электроэнергии обычно достигается при разрушении горной породы методом растяжения, в тоже время, обычно на практике воплотить указанный метод и организовать непрерывную промышленную переработку, к сожалению, пока еще никому не удавалось. Альтернативой методу растяжения может стать применяемый в настоящее время метод тангенциального нагружения, который является следующим по энергозатратности промышленным способом, при этом сдвиговое напряжение в процессе разрушения становится основным. Однако в настоящее время в большинстве случаев используются классические способы измельчения, такие как многостадийное дробление, в специализированных дробилках и помол во всевозможных мельницах, которые в своей работе как основной метод зачастую используют сжатие – один из высокзатратных способов разрушения.

1.2 Обзор существующих теорий измельчения

В настоящее время используются различные подходы при создании теоретических моделей для анализа процесса разрушения гонных пород на этапе измельчения. Однако в полной мере не существует решений, позволяющих адекватно оценивать параметры этого процесса для горных пород, обладающих пластическими свойствами, с точки зрения исходного их состояния, качества получаемого продукта, а также необходимых для этого энергозатрат.

В конце XIX века ряд ученых предложили выражения, позволяющие оценивать затраты энергии при измельчении. Р. П. Риттенгер предположил, что энергия, необходимая для измельчения, пропорциональна разнице площадей конечного и исходного продукта.

$$A = k\Delta S, \quad (1.1)$$

где A – работа необходимая для измельчения горной породы;

k – эмпирический поправочный коэффициент, который рассчитывается для конкретной горной породы;

ΔS – величина вновь образованной поверхности.

Позднее в 1874 году В. Л. Кирпичев, а затем, Ф. Кик на основе ряда исследований установили, что на необходимую для измельчения работу влияет предел прочности на сжатие гонной породы и объём её разрушения.

Формулу Кирпичева-Кика Л. Б. Левенсон [3] изложил в виде:

$$A = \frac{\sigma_{сж}^2 V_0}{2E}, \quad (1.2)$$

где A – расходуемая на измельчение работа;

$\sigma_{сж}$ – предел прочности гонной породы на сжатие;

V_0 – исходный объём горной породы;

E – модуль упругости горной породы.

Р. Гийо [28] гипотезу Кирпичева-Кика употребляет при измельчении крупных кусков породы, а Риттингера – при измельчении мелких.

Бонд [90] в 1951 году на основе ряда эмпирических исследований предложил свою гипотезу:

$$A = k \left(\frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{cp}}} \right) G, \quad (1.3)$$

где k – эмпирический коэффициент пропорциональности;

D_{cp} и d_{cp} – соответственно средняя крупность элементов породы до и после измельчения;

G – количество измельчаемой породы.

Гипотеза, предложенная Ф. С. Бондом [140], по заключению Р. Гийо, является чем-то средним между гипотезой, предложенной Риттингером и гипотезой Кирпичева-Кика.

На основе исследований, в 1956 году А. К. Рундквист рекомендовал общую формулу расчета, когда степень n у каждого размера частицы определяется экспериментами. Сама расчетная формула выглядит при этом следующим образом:

$$A = k_p \frac{i^{n-1}}{D_{cp}^{n-1}} G, \quad (1.4)$$

где A – энергозатраты на измельчение;

k_p – поправочный коэффициент обеспечивающий пропорциональность;

i – необходимая степень измельчения;

D_{cp} – средняя крупность элементов породы до измельчения;

G – количество измельчаемой породы.

Формула А. К. Рундквиста переходит в формулы Риттингера и Бонда при значениях $n = 2$ и $n = 2,5$. Когда же $n \rightarrow 3$ (особенно, когда $n = 3$), после произведенного раскрытия неопределенности формула Рундквиста приближается к формуле Кирпичева-Кика.

В 1956 году П. Ребиндер порекомендовал новый подход, оценивая работу, приходящуюся на последующее измельчение, как энергию, которая тратится на деформацию материала и получение новых поверхностей образуемых частиц, т.е.

работа складывается из энергии по двум гипотезам – Кирпичева-Кика и Риттингера:

$$A = k_v V + k_s \Delta S, \quad (1.5)$$

где k_v и k_s – соответствующие коэффициенты пропорциональности;

V – объём деформируемого материала;

ΔS – приращение площади вновь образованных поверхностей.

По П. Ребиндеру при дроблении образуются микроскопические трещины, их поверхность соразмерна усилию. После снятия напряжения энергия возвращается [90].

Работа, которая тратится на разрастание микротрещин частиц, разрушает тело. В результате переданная необходимая для измельчения тела энергия в таком случае принимается пропорциональной поверхностной энергии появляющихся микротрещин.

Употребив впоследствии подходы П. Ребиндера, В. Елисеев [38] изменил исходную зависимость для определения необходимой для процесса измельчения зерна работы:

$$A = B \lg \frac{S_k}{S_0} + C(S_k - S_0), \quad (1.6)$$

где S_k – конечная площадь поверхностей частиц при измельчении;

S_0 – изначальная площадь поверхностей частиц;

B и C – опытные поправочные коэффициенты, которые задаются в принятых единицах затрачиваемой работы.

В тоже время, многие исследователи установили, что по мере уменьшения размеров измельчаемых частиц увеличивается сопротивление разрушению вследствие масштабного фактора [92]. Для многих горных пород их предел прочности можно вычислить по формуле:

$$\sigma = \sigma_0 + k_1 \sqrt{x}, \quad (1.7)$$

где σ_0 – предел прочности измельчаемого материала для стандартного образца;

x – размер частицы измельчаемой породы;

k_1 – коэффициент, рассчитанный по формуле:

$$k_1 = \sqrt{\frac{6\pi\gamma G}{1-\nu}}, \quad (1.8)$$

где γ – удельная поверхностная энергия;

G – модуль сдвига материала;

ν – коэффициент Пуассона.

Если рассматривать два элемента породы с размерами частиц x и $x-\Delta x$, то изменение работы разрушения будет вычисляться по формуле:

$$\Delta A = A' - A'' = \frac{(\sigma_0 + k_1\sqrt{x})^2 x^3}{2E} - \frac{(\sigma_0 + k_1\sqrt{x-\Delta x})^2 (x-\Delta x)^3}{2E}. \quad (1.9)$$

При вычислении с погрешностью до малых значений второго порядка и принимая приращение размера частицы как бесконечно малое, то выражение (1.9) можно представить в следующем виде:

$$dA_0 = -\frac{\left(\frac{3\sigma_0^2}{x} + \frac{5\sigma_0 k_1}{\sqrt{x^3}} + \frac{2k_1^2}{x^2}\right) dx}{2E}. \quad (1.10)$$

Используя выражение (1.10) можно определить общий расход энергии при измельчении породы от размера частиц D до d :

$$A_0 = -\frac{3\sigma_0^2}{2E} \int_D^d \frac{dx}{x} - \frac{5\sigma_0 k_1}{2E} \int_D^d \frac{dx}{\sqrt{x^3}} - \frac{k_1^2}{E} \int_D^d \frac{dx}{x^2} \quad (1.11)$$

На основании выражения (1.11) для известных размеров частиц количество работы на измельчение будет:

$$A_0 = \frac{3\sigma_0^2}{2E} \ln \frac{D}{d} + \frac{5\sigma_0 k_1}{2E} \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) + \frac{k_1^2}{E} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (1.12)$$

На основании анализа выражения (1.12) видно, что работа на измельчение породы зависит от степени измельчения, физико-механических свойств и содержит компоненты, отвечающие за поверхностные и объёмные свойства. Представленное выражение согласуется с гипотезой Рибендера, а также с выражениями для расчета полной энергии разрушения Кирпичева-Кика, Реттингера и Бонда, однако не учитывает конкретных параметров нагружения элементов породы.

Анализ полученных выражений показывает, что на любом этапе измельчения энергозатраты зависят от степени измельчения, причем кратно увеличиваются при уменьшении размера частиц менее миллиметра (рисунок 1.1).

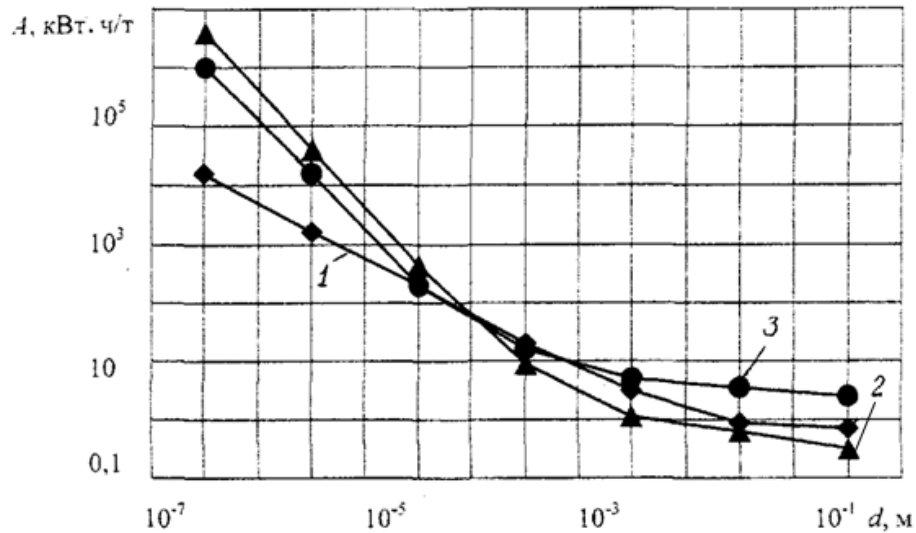


Рисунок 1.1 – Зависимости затрачиваемой на разрушение энергии от размера измельчаемых частиц (1 – кварц, 2 – апатит, 3– кальцит) [92]

Представленные зависимости согласуются и известными диаграммами Р. Хукки, что подтверждает правильность полученных выводов [135].

Представленные здесь гипотезы могут описывать не все виды и эффекты воздействий (химического, теплового, механического). Результаты расчета работы невозможно впоследствии использовать для определения нужной энергии на должном практическом уровне для широкого круга материалов [138]. Как следствие, большое число учёных и исследователей в свое время пришли к заключению о разумности заострения академического внимания главным образом на изучении процесса измельчения на основе эмпирических исследований, построенных на использовании типовых решений, для различных по механическим свойствам материалов для конкретных механизмов разрушения горных пород [139, 141].

Так как промышленное измельчение в реальности обычно производится в большинстве случаев с телами неправильной геометрической формы, Г. Румпф [96] логично полагает неосуществимым определение полного необходимого в процессе измельчения напряжения и, считает однозначно целесообразным в ходе

проведения испытаний изучить происходящие процессы, имеющие место в применяемой конкретной измельчающей машине. А для этого следует создать подходящие для практического решения подобных задач актуальные методики проведения подобных экспериментов.

Последующую оценку полученной методики анализа измельчения, как правило, проводят с применением некоторых индикаторов, таких как степень фактического измельчения частиц, энергоёмкость, состав породы, иные признаки, чтобы установить эффективность по расходу к объёму материала тела или к объёму полученных частиц. Энергоёмкость процесса измельчения традиционно определяют посредством проведенных практических замеров расходуемой энергии.

1.3 Анализ современных способов измельчения горных пород

Процесс измельчения горной породы фактически являет собой работу, потраченную на разрушение материала с помощью внешних сил. Разрушение при этом происходит по ослабленным изначально сечениям массива, у которого перманентно имеются микродефекты, которые способствуют превышению предельных напряжений на определенных участках вследствие преодоления предела упругих деформаций [90].

«Ударное дробление» происходит за счет динамических нагрузок [108, 122], когда разрушение происходит за счет одновременного сжатия, растяжения, изгиба и сдвига. На основе производственного опыта были установлены два наиболее эффективных вида разрушения: разрыв – как результат действия растягивающих напряжений, а также сдвиг – как результат последствия касательных напряжений.

Последующее определение разновидности применяемого разрушения опирается на соответствующие физические свойства материала, а также на размер и габариты горной породы. Так, если указанному разрушению подвергаются прочные горные породы, разумно использовать такие технологии, как удар,

раздавливание или излом. Если стоит задача разрушения пластичных пород – в большинстве случаев необходимо использовать удар или раздавливание, совместно с истиранием. Если необходимо разрушать хрупкие породы, то для этого используется раскалывание [90, 130, 132].

Процесс измельчения горных пород многостадийный, что позволяет на каждом этапе в зависимости от свойств получаемого материала выбирать наиболее эффективные методы переработки, которые реализуются соответствующим типом оборудования. Используются две основных стадии переработки: дробление и помол. В зависимости от размеров продукта после измельчения дробление может быть крупное, среднее, мелкое; помол – грубый, средний, тонкий, сверхтонкий.

Традиционно используемые разновидности деформаций и способы разрушения горной породы, нашедшие применение в дробильно-измельчительных машинах и механизмах различного профиля, представлены в данных таблицы 1.1.

Таблица 1.1 –Виды воздействия различных машин для измельчения

Тип применяемого механизма	Вид получаемой деформации	Способ осуществления разрушения
Щековая дробилка	Сжатие	Раздавливание
Конусная дробилка	Сжатие / Растяжение / Сдвиг	Раздавливание / Раскалывание / Истирание
Ударная дробилка	Сжатие / Сдвиг	Истирание / Удар / Раздавливание
Валковая дробилка	Сжатие	Раздавливание
Шаровая мельница	Сжатие / Сдвиг	Истирание / Раздавливание (удар)
Валковый пресс	Сдвиг / Сжатие	Раздавливание

К основным существующим разновидностям применяемых нагрузок в основном относят два распространенных способа деформирования – мягкий либо жесткий удар. По причине того, что и тот, и другой весьма ощутимо влияют на конкретные свойства измельчаемых материалов. Понятно, что существенные отличия измельчающих систем относительно просто определяются при эксплуатации измельчающих машин, в которых при разрушении куска горной

породы реализуется процесс, который смещается из зоны упругих деформаций в зону пластических, что неизменно приводит к разрушению [18, 19, 49, 109].

Практически все горные породы в своей структуре имеют дефекты в виде микротрещин. При воздействии на породу механизмов измельчения за счет упругих деформаций микротрещина увеличивается, что приводит в конечном итоге к разрушению массива. В природе имеются минералы, которые в своей структуре содержат элементы, имеющие различные модули упругости. В таких случаях в процессе нагружения энергия от упругой деформации концентрируется в основном во фрагментах породы, обладающих более высоким модулем упругости, что приводит к развитию трещин именно в этих элементах [53, 115].

При мягком режиме дробления горной породы энергия, приводящая к разрушению, в основном передается от нагружающего механизма, и реализуется спонтанное разрушение, вследствие возникающих многочисленных дефектов [78]. Традиционно эти машины и механизмы обладают ощутимо более значительными степенями свободы рабочего органа, и при существенном запасе кинетической энергии может достигаться высокая степень дробления куска породы по причине наличия вторичных множественных очагов деформаций. Касаясь селективности проводимого разрушения, стоит непременно отметить, что в таком рабочем режиме получаемый результат вероятен только для относительно разнопрочных измельчаемых минералов, которые присутствуют в горной породе [92]. При осуществлении жёсткого или мягкого контролируемого деформирования минералов с разными модулями упругости вероятно появление состояний с возникновением селективного разрушения.

Величина деформации и ход рабочего органа механизма существенно влияет на итоговый эффект при работе в режиме мягкого нагружения. Вероятны два основных варианта деформации – ограниченная и неограниченная. При первом варианте разрушаемый материал деформируют в пределах установленной конструкцией рабочего органа значениями величины его хода. Данная величина хода соответствует достижению необходимых для разрушения усилий в измельчаемых объектах.

В том случае, если реализуется второй вариант деформации, то при мягком нагружении внутри конусной инерциальной дробилки за счет накопленной в агрегате кинетической энергии от подвижного конуса или потенциальной энергии пружин в измельчителях, основанных на другом принципе действия, энергия отдается разрушаемому объекту, даже если это ему не требуется. Излишняя получаемая энергия в этом случае способствует переизмельчению, или подпрессованию продуктов дробления [143]. В некоторых машинах для измельчения, таких как дробилки инерционного типа, такой процесс приводит к интенсификации дробления на основе объёмной деформации в измельчаемом слое. В тоже время в барабанных мельницах в процессе помола деформация измельчаемого продукта производится за счет избытка кинетической энергии мелющих шаров, и, следовательно, к переизмельчению с дополнительной потерей энергии, которая рассеивается впоследствии в виде тепла, передаваемого окружающей среде. Поэтому для стабилизации теплового режима применяют футеровку тепла, которое получается в ходе пластической деформации при измельчении [35–37, 91, 145, 147].

Большая часть широко используемых горных пород принадлежит к хрупким породам, вследствие чего результат дробления зависит от двух причин – от вида нагружения и его длительности. Однако при производстве строительных материалов, которое растёт с каждым годом, приходится сталкиваться с материалами, обладающими пластическими свойствами, что приводит к значительному перерасходу энергии при использовании типовых технологий дробления.

Дробильные машины ударного воздействия: центробежные машины, молотковые дробилки и другие, принципиально похожие на них, где процесс происходит, как дробление посредством деформации в зоне контакта рабочих органов, либо используемых отбойников, взаимодействующих с разрушаемым материалом. Как правило, основные различия, влияющие на способ воздействия в процессе разрушения, зависят от скоростей рабочих органов и количества соударений. Машины такого типа реализуют мягкий способ нагружения, в этом

случае кинетическая энергия, отдаваемая горной породе, переходит в потенциальную энергию, а затем в другие виды, способствуя росту упругих деформаций [10, 16, 17, 24, 42, 79, 82, 86, 128, 133].

Для дробления относительно мягких материалов, обладающих пластическими свойствами, в настоящее время используются механизмы дробления ударного воздействия (рисунок 1.2) [11, 15, 30, 44].

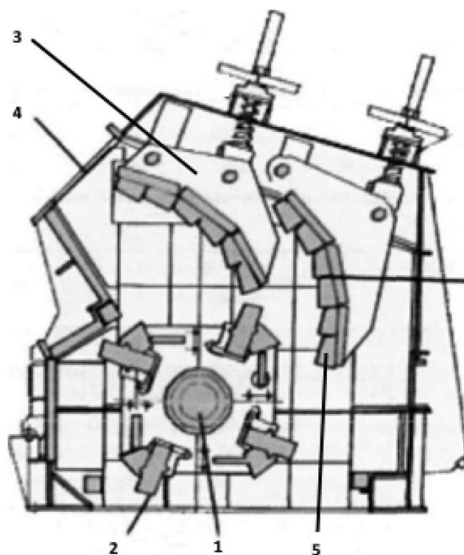


Рисунок 1.2 –Машина для измельчения ударного действия:

1 – ротор измельчителя; 2 – вращающиеся молотки; 3 – отбойная плита;
4 – корпус установки; 5 – футеровочные пластины

Такой способ дробления реализуется за счет удара по материалу рабочих органов, а также отлетающими кусками друг о друга, в качестве рабочих органов могут использоваться молотки, плиты и стержни дробилки, колосники. Разрушение в таком случае осуществляется или за счет единственного раскола, или от последовательности расколов до величины менее выходного отверстия измельчительного агрегата.

Крупное дробление чаще всего реализуется с помощью конусных или щековых дробилок. Измельчение в таких машинах происходит за счет разрушения массивов руды в зоне, образованной подвижной и неподвижной щеками.

На рисунке 1.3 изображена конструкция щековой дробилки, в которой дробление производится с помощью качания щеки.

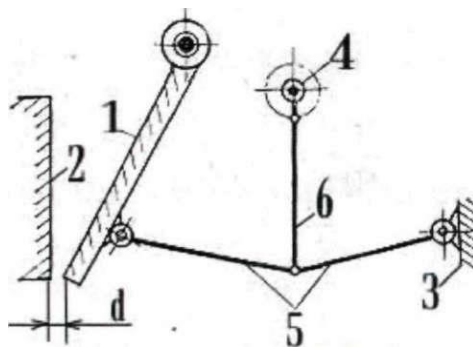


Рисунок 1.3 – Кинематическая схема действия щековой дробилки:
 1 – подвижная щека; 2 – неподвижная щека; 3 – упорная боковая плита;
 4 – маховик; 5 – распорные рычаги; 6 – шатун

При работе щековой дробилки подвижная щека раздавливает куски горной породы, измельчая их до размеров меньше, чем зазор разгрузочной щели, после чего они удаляются из рабочей зоны. Величина разгрузочной щели в зависимости от требуемого размера кусков получаемой породы может регулироваться. Щеки дробилки выполняют также предохранительные функции, при попадании крупного, недробимого предмета, они ломаются, что защищает привод машины от перегрузки. Плиты щек бывают рифленые и гладкие, выполненные из закалённого чугуна или марганцовистой стали. Большинство щековых дробилок имеют размеры окна для загрузки от 100×150 мм до 1500×2100 мм [31].

Производительность таких машин связана с размером загрузочного окна, частотой движения щек и характеристикой руды, и может изменяться в диапазоне 0,5–1000 тонн в час со средней степенью дробления $i=3\div 5$.

Недостатком щековых дробилок является то, что они эффективно могут использоваться только для крупного дробления хрупких материалов.

Конусные дробильные машины могут использоваться для всех видов дробления. Такие измельчители работают в непрерывном режиме. Дробление в них происходит в рабочей зоне между двумя конусами, один из которых подвижный, а второй неподвижный.

Схема дробильной машины конусного типа показана на рисунке 1.4. [39, 45]. На вертикальной оси агрегата установлен внешний неподвижный конус 1. На валу 3, установленном под углом 2–3° относительно оси корпуса дробилки расположен вращающийся конус 2. Внизу вал находится внутри корпуса

эксцентрика 4 и опирается в подпятник 6, а сверху установлен в подшипник 5, который крепится к эксцентрику главной станины.

При вращении вала подвижный конус обкатывается по неподвижному, вследствие чего происходит периодическое изменение зазора между ними, что обеспечивает дробление горной породы. Горная масса поступает в зону дробления сверху через загрузочное окно, а разгрузка происходит через нижний зазор между конусами. Далее раздробленная масса попадает в нижнюю чашу или выходит через отводящий лоток.

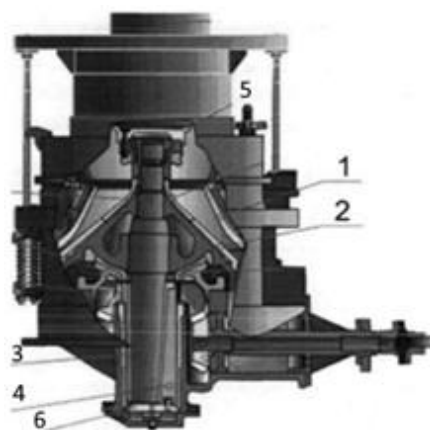


Рисунок 1.4 – Схема устройства конусной дробильной установки:
1 – стационарный конус; 2 – вращающийся конус; 3 – вал вращающегося конуса;
4 – корпус эксцентрика; 5 – верхний подшипник; 6 – основание подпятника

В отличие от щековых, конусные дробилки обеспечивают разрушение породы различными способами (раздавливанием, изломом, раскалыванием, истиранием), поэтому являются более эффективными. Также конусные дробилки обеспечивают хороший угол захвата β (в пределах 24–28°).

Конусные инерционные дробильные машины (КИД) (рисунок 1.5) заслуживают особого внимания [77, 85], они бывают различных типоразмеров.

Дробящий наружный конус 1 и подвижный внутренний конус 2 защищаются обращенными друг к другу бронями. Камера дробления 3 образуется поверхностями этих конусов. Небалансный вибратор 5 установлен на цилиндрическую поверхность вала 4, на верхней части которого расположен подвижный конус 2. Машина уравнивается за счет противовибратора 6, установленного в корпусе на подшипниках.

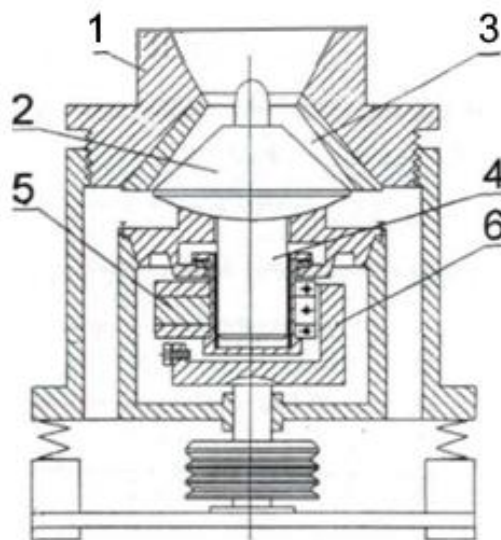


Рисунок 1.5 – Схема конусной инерционной дробильной машины

Под действием центробежной силы подвижный конус дробилки эксцентрично обкатывается по неподвижному конусу либо без зазора, или в режимах, обеспечивающих движение по слою измельчаемой породы. Инерционные дробильные агрегаты хорошо регулируют значение силы разрушения, а также степень измельчения, которая может изменяться от 4-х до 30-ти. За счет зазора легко регулируется амплитуда колебаний подвижного конуса. В конусных инерционных дробилках в верхнем пространстве рабочей зоны может реализовываться как одиночное, так и многократное разрушение, а в нижнем пространстве только объёмное разрушение в слое.

Принцип действия КИД реализуется за счет различных механизмов измельчения: поверхностное истирание, раскалывание по трещинам, разрушение за счет неоднородности слоев. Результат процесса измельчения можно легко оценивать таким свойством, как трещиностойкость составляющих элементов полученной горной массы. На завершающих стадиях измельчения конусные инерционные дробилки могут работать в режиме валкового пресса в соответствии с характером воздействия на измельчаемую массу, в тоже время в КИД может реализовываться только мягкий режим дробления при условии неограниченной деформации. При различных концентрациях минералов с различными свойствами такие режимы могут повлиять на селективность разрушения[117, 124].

Для среднего дробления горных пород используют валковые механизмы, где производится дробление двумя вращающимися валками. Поверхность обоих валков бывает зубчатая, рифленая либо гладкая. Механизм дробления представлен на рисунке 1.6 [111, 119, 120]. Опорный вал 2 неподвижного валка установлен на подшипниковых буксах 1, которые закреплены на раме станины 5 корпуса дробилки, опорный вал 4 подвижного валка закрепляется в направляющих буксах, которые поджимаются пружинами 3 к крышкам направляющих тяг.

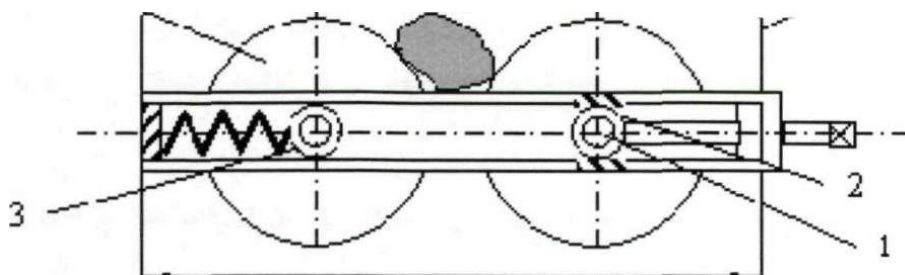


Рисунок 1.6 – Схема двухвалковой дробилки с гладкими валиками

Исходная порода подается от питающей воронки и поступает в зону дробления, а измельчённый до соответствующего параметра крупности готовый продукт выгружается. Крупность дробления легко регулируется за счет величины зазора между валиками. Для защиты валков от износа на них установлены бандажи, которые имеют толщину от 75 мм до 250 мм. Для обеспечения хорошего захвата гонной породы валковые дробилки должны иметь диаметр валков от 20 до 25 раз больше размера самого крупного куса исходной породы. Если валки гладкие, степень дробления у них невысока ($i = 2 \div 4$).

Зазор между валками не заполняют полностью при подаче дробимого материала, следовательно, порода может иногда проскакивать между валками, что вызывает их преждевременный износ и снижает эффективность дробления.

Для уменьшения размера частиц при дроблении применяются дробилки (прессы) высокого давления или валковые мельницы (ВМВД) [88, 127, 134]. В таких машинах осуществляется процесс раздавливания породы роликами (валиками), которые должны вращаться навстречу. Общий вид измельчителя типа валковый пресс изображен на рисунке 1.7 [109].



Рисунок 1.7 – Общий вид валково-мельничной дробилки высокого давления

На раме валкового пресса монтируются два валика, один из которых жестко зафиксирован в подшипниках, а другой валик может перемещаться вместе с буксой вдоль направляющей поверхности рамы. Из предварительного бункера в зону дробления образованную двумя валиками, которая в полтора раза больше, чем зазор при холостом ходе, куда поступает исходная руда.

Конструкция валкового пресса аналогична валковой дробилке, но воздействие на породу у них разное, так как в валковых прессах разрушение в основном происходит при воздействии дробимых элементов между собой, что обеспечивает более эффективную передачу энергии для разрушения. Дробление в ВМВД происходит в закрытом пространстве, не позволяя вырваться частицам из зоны деформации, следовательно, обеспечивается более высокая производительность и снижение степени износа оборудования по сравнению с машинами другого типа. Конечный продукт после первого этапа дробления может содержать от 20 % до 40 % измельченного продукта нужной фракции. На последующих этапах измельчения материал будет иметь значительно меньший индекс работы Бонда.

Для повышения эффективности и реализации селективного разрушения породы одновременно с предотвращением переизмельчения, необходимо в таких измельчителях иметь возможность изменения спектра нагрузок, так как параметры дробления нелинейно зависят от размеров кусков породы [52, 73].

В барабанных мельницах чаще всего проводится тонкое измельчение горных пород. При вращении барабана мельницы происходит измельчение породы за счет ударов мелющих шаров и истирания свободно перемещающимися элементами породы. Конструкция мельницы представлена на рисунке 1.8.

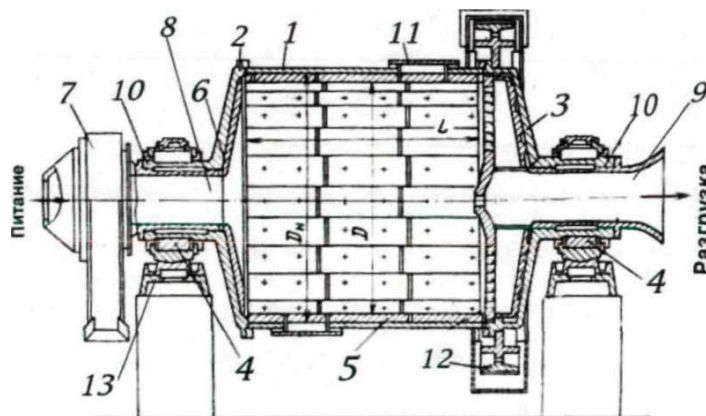


Рисунок 1.8 – Конструкция шаровой мельницы мокрого измельчения с периодической выгрузкой через нормированную решетку:

1 – барабанный корпус мельницы; 2,3 – крышки для загрузки и выгрузки породы; 4 – опорные подшипники барабана; 5 – футеровочные пластины цилиндрической части корпуса; 6 – футеровочные пластины крышек; 7 – питатель для загрузки измельчаемой породы; 8, 9 – питающий и отводящий патрубки; 10 – трубчатые буксы; 11 – люк; 12 – приводная шестерня; 13 – фундаментные опоры

Корпус мельницы имеет вид стального барабана 1 с торцевыми крышками 2 и 3, которые устанавливаются с двух сторон барабана. Установка имеет специальной формы буксы 10, которые упираются на фундамент через опоры 13 и подшипники 4 [55].

Для защиты внутренних поверхностей барабана и боковых крышек применяются броневые пластины 6 и 5. Загрузка барабана происходит через питающий патрубок 8, а разгрузка через отводящий 9. Люк 11 предназначен для обслуживания внутреннего объема агрегата. Через шестерню 12 производится привод барабана, а загрузка производится посредством питателя 7, в который измельчаемый материал подается в виде раствора пульпы. Использование мокрого измельчения не подходит для ряда пластичных горных пород, таких как гипс, тальк и других, и кроме того для осушения измельченного продукта потребуется дополнительная энергия.

Для помола горных пород в промышленности широко используются мельницы, как со стальными, так и чугунными шарами, либо стержневые мельницы со стальными стержнями. Также встречаются галечные с мелющими элементами в виде камней из кремния, кварца и др. Используют также мельницы, основанные на принципе самоизмельчения, в которых помол происходит между крупными кусками самой измельчаемой массы [58, 88].

Измельчение в шаровых мельницах происходит за счет ударов и трения между стенками мельницы и свободно движущимися внутри барабана шарами. При вращении мельницы шары за счет трения между собой и стенками барабана смещаются вверх и при превышении угла естественного откоса скатываются вниз, обеспечивая каскадный режим измельчения (рисунок 1.9, а).

При использовании каскадного режима мельницы в основном измельчение происходит за счет раздавливания и истирания. Если скорость вращения барабана увеличить, то возникает водопадный режим измельчения (рисунок 1.9, б), при котором за счет сил значительных центробежных сил мелющие тела перемещаются на более высокие траектории движения, что приводит к увеличению доли разрушения за счет ударов шаров, а процесс истирания проявляется значительно меньше [91].

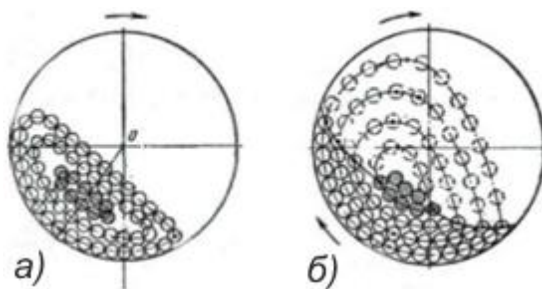


Рисунок 1.9 – Схема каскадного (а) и водопадного (б) режимов помола барабанной шаровой мельницы

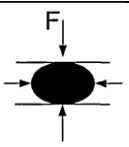
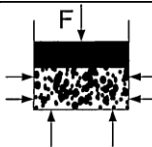
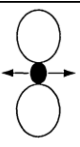
При дальнейшем увеличении скорости вращения барабана мельницы, за счет центробежных сил, которые приравняются к силе тяжести, которая действует на шары, приведет к прижиманию шаров ко внутренней поверхности барабана. Такой режим называют критическим. Если вращение происходит еще быстрее – в режиме сверхкритическом, то дробление ударом исключается, а шары и руда

истирают друг друга из-за относительного движения. Самый эффективный вариант измельчения породы присутствует в случае, когда шары падают с наибольшей высоты. Шаровые мельницы принадлежат к измельчительным агрегатам мягкого разрушения, так как часть переданной энергии дробящих элементов преобразуется в пластическую деформацию футеровки барабана, а также самих элементов дробления, что как следствие приводит к снижению энергии, затрачиваемой на разрушение породы, и, снижению эффективности [65]. Потому производительность низкая. Кроме того, в шаровых мельницах нет возможности надежного регулирования величин давления на измельчаемый материал, так как такая схема воздействия шарами реализуется хаотично при скатывании с внутренней поверхности барабана.

Перечисленные дробильно-измельчительные аппараты применяют различные методы разрушения, их сравнительные характеристики представлены в таблице 1.2 [4, 9, 14, 25–27, 43, 74–75, 84].

Любой механизм, используемый для разрушения пород должен иметь возможность подстраиваться к конкретной структуре измельчаемого материала. Но нет системы, описывающей связь реакции свойств руды с применяемыми воздействиями. Свойства руды, в большинстве случаев, установить, возможно, а измельчающих её аппаратов – нет.

Таблица 1.2 – Виды разрушающих воздействий измельчительных машин

Показатель	Характеристики измельчительных машин		
	Валковая дробилка	Валковый пресс	Шаровая мельница
Тип машины	Валковая дробилка	Валковый пресс	Шаровая мельница
Схема воздействия			
Тип воздействия	Частица-поверхность	Частица-частица	Частица-поверхность
Зазор	Устанавливается	Зависит от прочности материала	Не устанавливается
Движение частиц	Да	Нет	Да
Разрушающая сила	Неконтролируемая	Строго дозированная	Малая
Спрессовывание	Нет	Есть	Нет

Классификация разрушающих видов дробильно-измельчительных машин по Э. А. Хопунову [152] базируется на трёх факторах: нагрузка, длительность нагрузки и место приложения (таблица 1.3). Для получения наиболее рациональных режимов измельчения при различных условиях рудоподготовки используются соответствующие способы достижения требуемых параметров измельчения [125].

Таблица 1.3– Классификация измельчительных машин по факторам воздействия

Аппарат	Параметры классификации по факторам разрушения										
	нагрузка					длительность		место			
	жесткая	мягкая	циклическая	однократная	спектр сил		квазистационарная	ударная	объемное	одиночное	истирание
					узкий	широкий					
Конусные, КМД	+				+		+			+	
Щековые	+		+		+		+				
Роторные		+			+		+			+	
Центробежные		+				+	+	+	+	+	
Инерционные, КИД		+	+		+		+		+	+	+
Валковые	+			+	+		+		+	+	
Барабанные		+		+		+	+			+	+

Разрушение возможно, когда на кусок влияют внешние силы и создаются деформации, направленные на разрыв связей решетки, но процесс трудно контролируется и хаотичен. По ослабленным сечениям происходит накопление деформаций и разрушение. Традиционно для измельчения используется сжатие, но растяжение и сдвиг требуют значительно меньших затрат энергии, поэтому при разработке измельчительных машин необходимо это учитывать [33, 98].

Если нужно производить щебень нужной фракции, то необходимо уменьшить элемент исходного материала в нужное число раз. При обогащении горных пород требуется достигать другую цель, в том случае если необходимо отделить нужную составляющую от пустой породы [121].

1.4 Анализ современных способов классификации горных пород

В процессе измельчения горных пород получается продукт, состоящий из элементов различного размера (крупности), которые необходимо разделять на фракции (классифицировать) с извлечением готового продукта с требуемыми параметрами, а не соответствующие отправлять на дальнейшее измельчение.

В настоящее время используются несколько способов классификации (механический, гидравлический, пневматический, электромагнитный, электрофизический, по цвету и др.), которые реализуются различными типами машин.

Наиболее распространённым является механический способ классификации, который заключается в разделении продукта на фракции по размерам на калиброванных ситах, решетках и колосниках. Для этих целей широко используются различные конструкции грохотов, барабанных классификаторов и др.

Гидравлическая классификация происходит в различных по конструкции гидроклассификаторах, где разделение осуществляется в водной среде на основе различия скоростей осаждения частиц от крупности.

Пневматическая классификация основывается на разделении продукта по крупности частиц в воздушном потоке за счет сил тяжести или за счет использования центробежных сил.

Определение крупности частиц породы осуществляется на основе ряда методов: ситовом, микроскопическом, седиментационном, кодуктометрическом, фотоимпульсном и др.

Для частиц размером более 0,074 мм обычно используется ситовый метод. Данный метод реализуется с помощью набора стандартных сит, на которых последовательно производится разделение на фракции породы по размеру частиц. После классификации на ситах подрешетный продукт взвешивают и выражают в процентах относительно общей массы пробы.

Аналитическое описание распределения функции массы частиц от размеров чаще всего производится на основе выражения Розина-Раммлера:

$$\frac{100}{R} = e^{md^n}, \quad (1.13)$$

где R – остаток частиц породы, полученный на сите с отверстиями диаметром d , в %;

e – основание натурального логарифма;

m и n – эмпирические коэффициенты, полученные для конкретного материала.

Эффективность классификации определяется как отношение массы подрешетного продукта к массе частиц породы заданной крупности в исходном материале в процентах по выражению Ханкока-Луйкена:

$$\eta = \frac{\varepsilon - \gamma}{100\alpha} \cdot 100\%, \quad (1.14)$$

где ε – извлечение;

γ – выход готового продукта;

α – содержание частиц готового продукта в исходном материале.

При η более 75 % процесс считается весьма эффективным, более 50 % – эффективным, менее 25 % – не эффективным.

В настоящее время в промышленности для классификации материалов по крупности частиц в основном используются различные виды грохочения. Процесс грохочения представляет собой процесс разделения кускового материала на классы по крупности частиц просеиванием на одном или нескольких последовательных сит с установленными размерами отверстий [3]. С точки зрения решаемых задач грохочение может быть:

- вспомогательным – при подготовке материала к измельчению (в том числе перед измельчением или между различными этапами измельчения);
- подготовительным – при разделении исходного материала на различные классы обработки;

- самостоятельным – при разделении материала на готовые продукты по классам;
- обезвоживающим – для отделения основной массы воды от промываемого материала;
- и др.

В зависимости от крупности частиц грохочение бывает:

- крупное, с размером просеивающего отверстия 100–300 мм;
- среднее – 25–60 мм;
- мелкое – 6–25 мм;
- тонкое – 0,5–5 мм;
- особо тонкое – до 0,5 мм.

Качество классификации на грохотах, их производительность и энергоэффективность зависят от свойств сыпучих материалов и правильности выбора просеивающих поверхностей (размеров и формы сита).

Грохоты можно классифицировать по форме просеивающей поверхности, они бывают с дуговыми ребрами, с плоскими колосниками, с цилиндрическими просеивающими поверхностями. Если рассматривать расположение относительно горизонта просеивающих поверхностей, то грохоты бывают горизонтальные, со слабонаклоненными рабочими поверхностями (углы наклона около 6–8°), со значительным наклоном (углы наклона около 16–28°). С точки зрения движения просеивающей поверхности грохоты бывают неподвижные или подвижные.

На рисунках 1.10–1.13 представлены схемы некоторых неподвижных грохотов.

Если рассматривать для классификации неподвижные грохоты, то конструкции их бывают достаточно разнообразны. Они могут иметь просеивающие поверхности различных размеров и формы. Так, например, колосниковые грохоты – это колосниковые решетки, расположенные под углом к горизонту от 25° до 30°, реже до 45°. В колосниковых грохотах порода движется под действием силы тяжести, при этом куски с размерами меньше, чем расстояние между колосниками, проваливаются в зазоры.

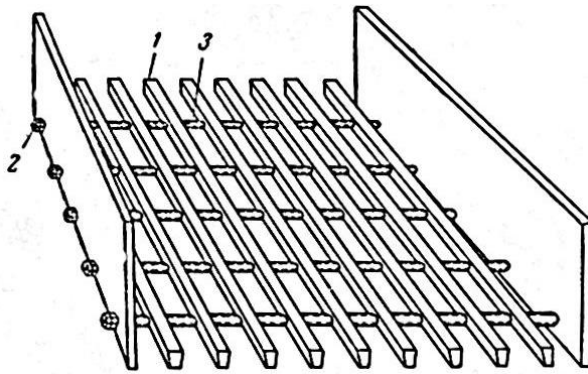


Рисунок 1.10 – Схема колосникового грохота
 1 – колосники, 2 – стяжные шпильки, 3 – распорные втулки

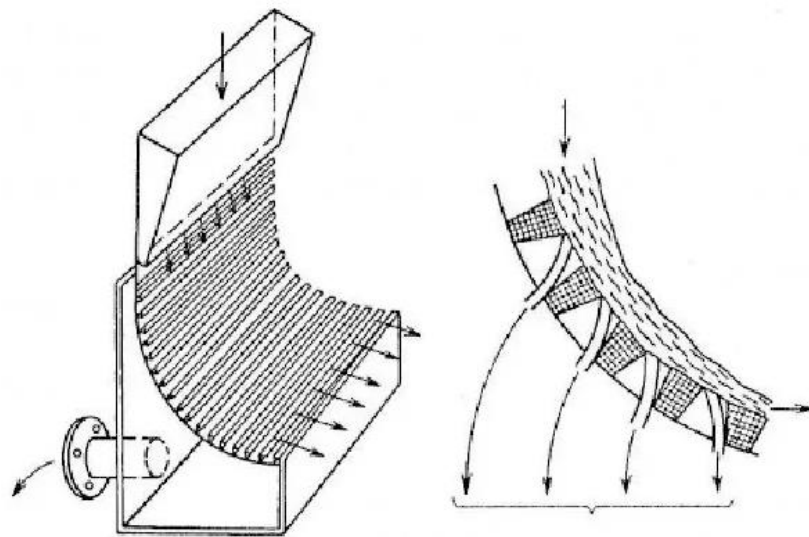


Рисунок 1.11 – Схема дугового гидравлического грохота

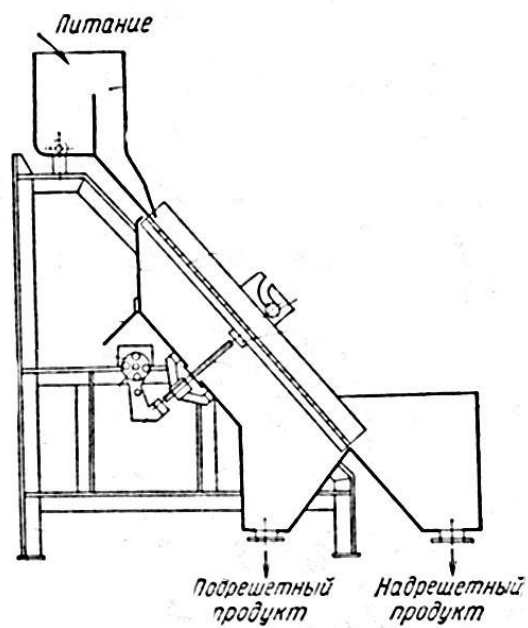


Рисунок 1.12 – Схема плоского гидравлического грохота

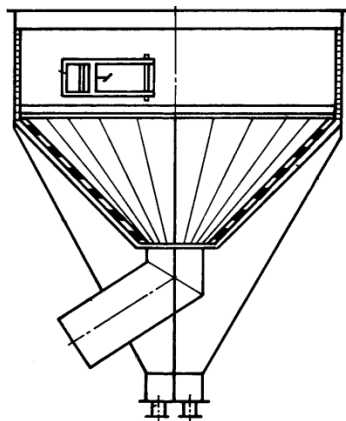


Рисунок 1.13 – Схема конического грохота

При использовании таких грохотов для классификации глинистых материалов, содержащих влагу, с целью повышения эффективности грохочения могут использоваться для самоочистки виброрешетки. Простота конструкции, а также отсутствие дополнительных энергозатрат на осуществление процесса представляются существенным достоинством колосниковых грохотов. Существенным недостатком таких устройств является низкая эффективность классификации (не превышает 50–60°), поэтому их используют обычно для отделения крупных фракций породы перед крупным дроблением.

При использовании мокрого грохочения на дуговых грохотах эффективность классификации может достигать 90°. Такие грохоты могут использоваться мелкого и тонкого грохочения с размером частиц 2,5–0,1 мм. Порода в виде пульпы направляется по касательной на шпальтовое сито, где за счет центробежных сил хорошо отделяется вода. Повышение эффективности грохочения добиваются за счет установки ударных или вибрационных устройств, которые обеспечивают встряхивание сита с частотой от 5 до 20 колебаний в минуту. Недостатком таких классификаторов является достаточно быстрый износ сеток, особенно если порода обладает абразивными свойствами.

Одними из наиболее современных конструкций неподвижных грохотов являются конические грохоты, например, грохот Megatex от компании RotexInc. Данный грохот при площади просеивания 30 м² обеспечивает производительность до 500 тонн в час, с эффективностью классификации до 90 %, имеет систему автоматической очистки.

Подвижные, по-другому механические, грохоты бывают инерционного типа, барабанные, с вибрационным приводом, валковые, с качающейся просеивающей поверхностью, резонансные и некоторые другие. В промышленности в большинстве случаев применяются грохоты вибрационного типа, которые обеспечивают достаточно высокую производительность и при этом обеспечивают высокую эффективность классификации.

У подвижных грохотов имеются подвижные просеивающие элементы, которые обладают вращательным или колебательным движением. К таким грохотам относятся валковые и барабанные грохоты, качающиеся (рисунок 1.14) и вибрационные (рисунок 1.15), у которых используются валковые, кулачковые или электровибрационные приводы.

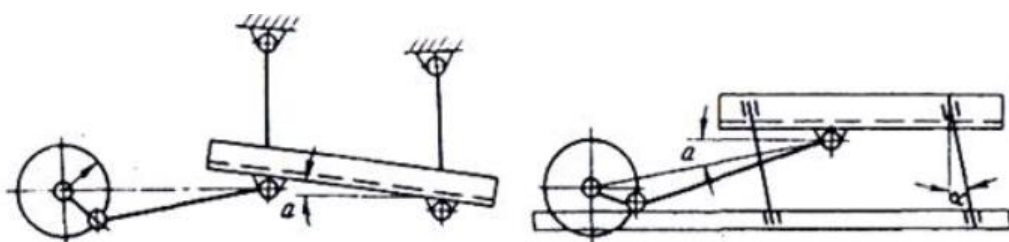


Рисунок 1.14 – Схема плоского качающегося грохота

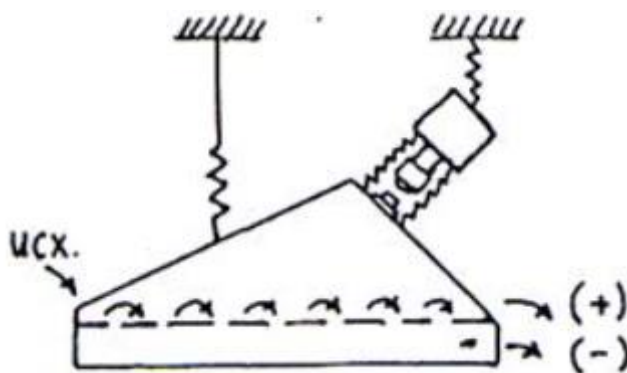


Рисунок 1.15 – Схема электровибрационного грохота

В последнее время во всем мире растет использование вибрационных грохотов с плоскими просеивающими поверхностями. По конструкции они бывают гирационные, с эксцентриковыми приводами или инерционные.

Гиравционные грохоты (рисунок 1.16) по сравнению с инерционными имеют более сложную конструкцию, и как следствие, меньшую надежность. В настоящее время у нас в стране грохоты такой конструкции не производятся.



Рисунок 1.16– Схема гиравционного грохота

За рубежом гиравционные грохоты изготавливаются для грохочения крупных и средних размеров кусков породы. Например, компании Kcipr и Smico производят тяжелые гиравционные грохоты с производительностью около 350 м³/ч, но относительно небольшими партиями.

Виброгрохоты с плоскими просеивающими поверхностями обладают повышенной производительностью, т.к. практически вся просеивающая поверхность является активной. По сравнению с другими видами грохотов они имеют меньшую массу подвижных поверхностей, что обеспечивает высокую энергоэффективность.

Инерционные грохоты с дебалансным вибратором (рисунок 1.17) обеспечивают движение просеивающей поверхности в пространстве по круговой траектории, что негативно влияет на процесс просеивания.

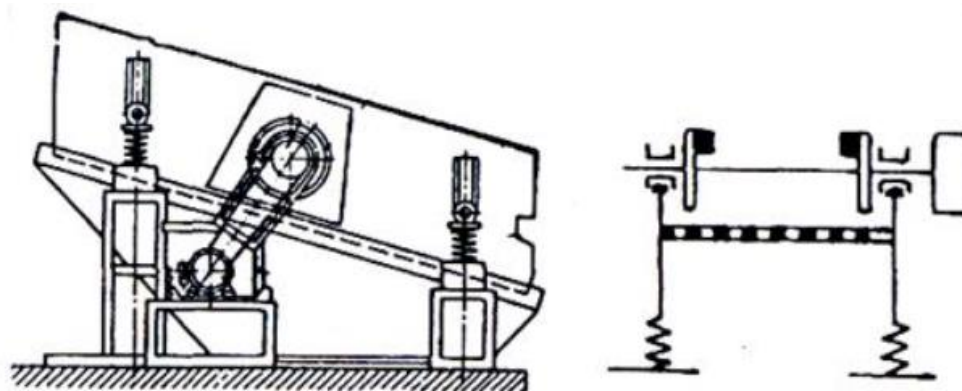


Рисунок 1.17 – Схема инерционного дебалансного грохота

Такого недостатка лишены инерционные грохоты с направленным движением плоских просеивающих поверхностей – самобалансные грохоты (рисунок 1.18). Обычно такие грохоты имеют небольшие размеры, и используются в мобильных установках (обладают производительностью до 100 тонн в час), основной их недостаток – это относительная сложность установки.

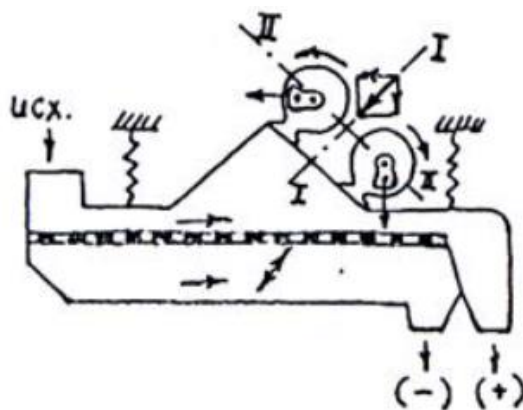


Рисунок 1.18 – Схема самобалансного грохота

Главным недостатком грохотов инерционного типа представляется зависимость величины амплитуды колебаний от загрузки. Кроме того, при пуске и остановке такого грохота конструкция подвергается резкому увеличению амплитуды колебаний, что может приводить к смещению установки, поэтому их необходимо устанавливать на специальные массивные фундаменты. В тоже время, простота конструкции, надежность, возможность регулировки технологических параметров обеспечивают таким грохотам широкое использование в различных отраслях промышленности.

Инерционные грохоты производятся у нас в стране многими предприятиями и за рубежом, например, компаниями Derrick, Smico, Midwestern и другими. Характерным представителем современных конструкций таких грохотов является грохот компании Derrick с мультивибратором, имеющим параллельно-дуговую многоярусную систему сит.

Кроме того, за рубежом в настоящее время все больше применяются резонансные грохоты (рисунок 1.19) производительностью до 350 тонн в час с эффективностью классификации до 96 %.

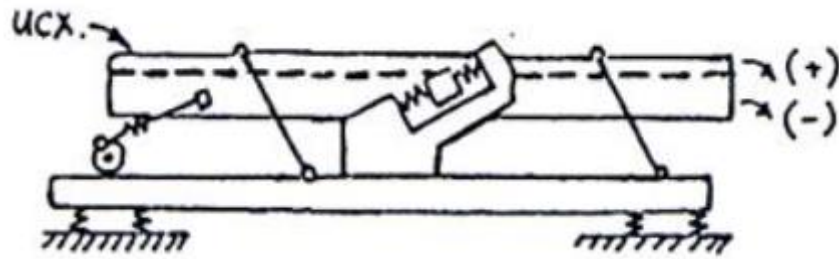


Рисунок 1.19 – Схема резонансного грохота

Резонансные грохоты, в отличие от вибрационных, имеют больший коэффициент использования мощности двигателя привода, что повышает их эффективность. В нашей стране пока такие грохоты применяются ограничено.

В нашей стране производится ряд плоских инерциальных грохотов, обеспечивающих различные по форме колебания просеивающей поверхности в горизонтальной плоскости. Например, ГИД-2000, ГИД-1500, ГМ-4 и др. обеспечивают круговую форму колебаний, ЛКД-2 и ЛКД-3 с изменяемой формой траектории колебаний. За счет регулировки параметров движения удается достигать высокого качества классификации исходного материала [3, 4, 15].

Помимо ситовых грохотов для классификации различных сыпучих материалов используются барабанные классификаторы непрерывного действия. У нас в стране и в других странах СНГ производят БК-1, СМА-298, БК-2, ВО, ЛБК и др. Барабанные классификаторы представляют собой сито в виде барабана, внутрь которого подается исходный продукт (рисунок 1.20). Конструкция барабана, состоящего из цилиндрических сит, с различными по размеру отверстиями, обеспечивает максимальное использование просеивающей поверхности.

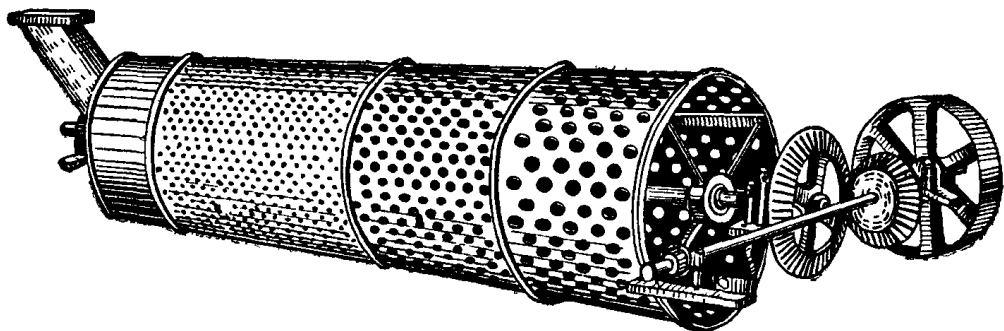


Рисунок 1.20 – Схема барабанного грохота

Для повышения эффективности классификации внутри ситового барабана могут устанавливаться специальные роторы, которые обеспечивают повышенную производительность агрегата. Барабанные грохоты могут эффективно использоваться для классификации и обеспыливания сыпучих материалов, в том числе и трудногрохотимых, имеющих волокнистую структуру или обладающих пластическими свойствами [64].

Рядом исследователей было установлено, что эффективность процесса классификации находится в зависимости от концентрации мелких частиц и частиц требуемой фракции в исходном материале [99]. Были предложены выражения, позволяющие выбирать режимы грохочения на барабанных классификаторах. Процесс классификации рассматривается как двунаправленный процесс с одновременным смешиванием и разделением частиц на фракции за счёт отсеивания частиц требуемого размера через перфорации в барабане. При этом концентрация крупных частиц в наружном слое постепенно возрастает, что снижает эффективность классификации. Было установлено, что в непрерывном режиме классификации его интенсивность снижается при перемещении породы от загрузочной области к разгрузочной, при этом увеличивается концентрация мелких частиц в области центра циркуляции.

Использование предложенных выражений на практике позволяет при разработке нового оборудования получать рациональные параметры геометрии рабочего пространства и выбирать оптимальные режимы работы устройства, в том числе и уже существующего.

Затраты энергии на классификацию в барабанных грохотах определяются в зависимости от требуемой массовой производительности G с учетом угла α наклона оси барабана к горизонту и коэффициента заполнения барабана породой φ . Также необходимо учитывать свойства материала (ρ – плотность материала, μ – коэффициент уплотнения частиц породы). Скорость вращения барабана должна определяться из условий движения частиц, которые поднимаются вверх при повороте поверхности сита на угол скатывания β (его величина обычно принимается от 38° до 40°) (рисунок 1.21,а).

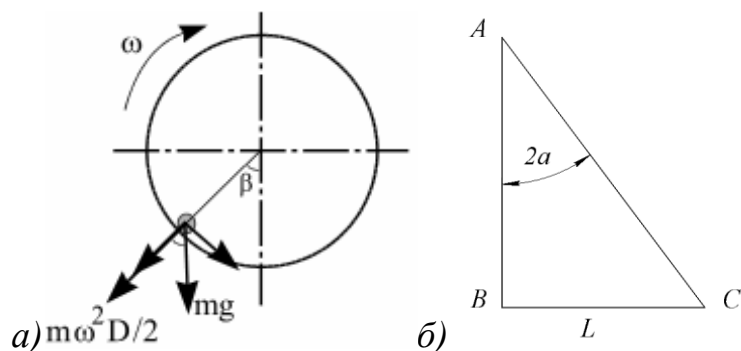


Рисунок 1.21 – Схема действия сил на частицу в барабанном грохоте (а), схема определения пути движения частицы в барабанном грохоте (б)

Исходя из условия скатывания частиц, можно определить частоту вращения барабана:

$$n = \sqrt{\frac{g \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{2\pi^2 \cdot D}}, \quad (1.15)$$

где g – ускорение свободного падения;

f – коэффициент трения частиц породы по просеивающей поверхности грохота;

D – диаметр грохота.

Частицы внутри грохота движутся по спиральной траектории с углом спуска приблизительно 2β , тогда длина пути частицы рассчитывается исходя из развертки спирали движения на плоскость (рисунок 1.21,б). Тогда скорость движения частицы будет:

$$V = \pi \cdot D \cdot n \cdot \operatorname{tg}(2\alpha), \quad (1.16)$$

тогда производительность грохота будет:

$$G = \mu \cdot \rho \cdot F \cdot V, \quad (1.17)$$

где $F = \pi \cdot D^2 \cdot \frac{\varphi}{4}$ – величина усредненной площади сечения проекции слоя классифицируемого материала в барабане.

Необходимая мощность привода барабанного грохота будет определяться из суммы мощностей для подъема материала и трения материала по просеивающей поверхности (с учетом КПД привода):

$$N = \frac{N_n + N_T}{0,9}. \quad (1.18)$$

$$N_n = \pi \cdot D \cdot n \cdot M \cdot g \cdot \sin \beta, \quad (1.19)$$

где $M = \mu \cdot \rho \cdot F \cdot L$ – масса грохотимого материала.

$$N_T = \pi \cdot D \cdot n \cdot M \cdot g \cdot f \cdot (\cos \beta + 2 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot D / g). \quad (1.20)$$

Затраты энергии на процесс классификации в барабанном грохоте достаточно велики, поэтому для снижения общих затрат на измельчение и классификацию конструкция измельчителя-классификатора по возможности должна совмещать оба процесса, чтобы параллельно протекающие процессы за счет синергии повышали энергоэффективность технологического процесса получения готового продукта.

1.5 Анализ процесса разрушения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами

При использовании оборудования истирающе-раздавливающего действия, например, бегунковых, валковых, катково-тарельчатых и др. мельниц, энергоэффективность процесса дробления слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, достаточно высокая. Процесс разрушения в таких измельчителях происходит со значительным объемным уплотнением материала, что оказывает положительное влияние на взаимодействие частиц породы между собой и с рабочими поверхностями агрегата. Частицы, которые примыкают к рабочим поверхностям измельчающего оборудования, обладают значительно меньшей возможностью перемещений в примыкающем слое, что существенно изменяет картину разрушения. В этом случае, процесс измельчения можно условно разбить на два важных этапа.

Первый этап происходит при незначительных нагрузках, он характерен уплотнением частиц, с формированием как упругих, так и пластических деформаций, на этом этапе происходит разрушение, в первую очередь, менее прочных фрагментов по наименее слабым сечениям или дефектам [21–23, 149].

В настоящее время не существует отработанной методики определения затрат энергии на уплотнение материала, обладающего пластическими свойствами, но ряд исследователей при решении различных задач по измельчению горных пород предлагали модели расчетов, позволяющие с некоторой точностью провести оценку данного процесса [94]. Так, при получении кубовидного щебня из сланцевой породы предложена модель для определения энергозатрат при уплотнении горной породы с помощью пресс-валкового агрегата (рисунок 1.22).

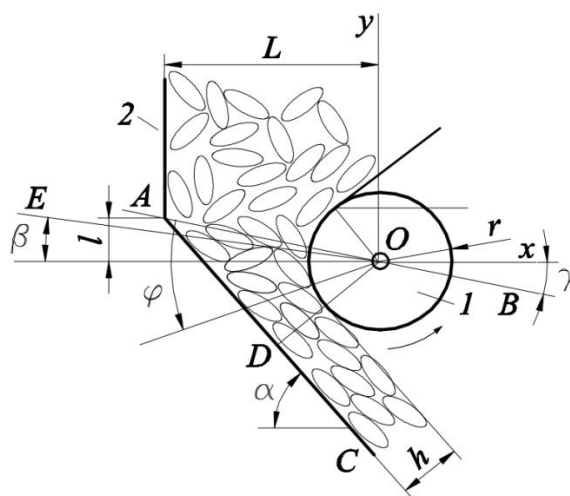


Рисунок 1.22 – Схема уплотнения породы в пресс-валковом агрегате

С целью выявления рациональных параметров агрегата был проведен анализ предложенной схемы. Было установлено, что сила, необходимая для уплотнения, зависит от расположения ролика 1 относительно корпуса бункера 2. Положение ролика определялось смещением его оси в горизонтальной плоскости на расстояние L и в вертикальной плоскости l относительно точки A . На рисунке 1.23 α – значение угла наклона нижней поверхности бункера, а β – расчетный угол захвата породы, h – высота слоя уплотненной породы в направлении линии OD , γ – угол наклона линии AB к горизонту $tg\gamma = l/L$. На ролик действует распределенная нагрузка q , величина которой растет по мере приближения уплотненной массы к линии OD . При этом величину q можно представить как произведение коэффициента определяющего свойства материала μ , Н/м^3 (гранулометрический состав, форма, размер частиц и др., определяется

экспериментально) на изменение полярной координаты относительно точки $O\Delta\rho$ ($q = \mu\Delta\rho$) (рисунок 1.23).

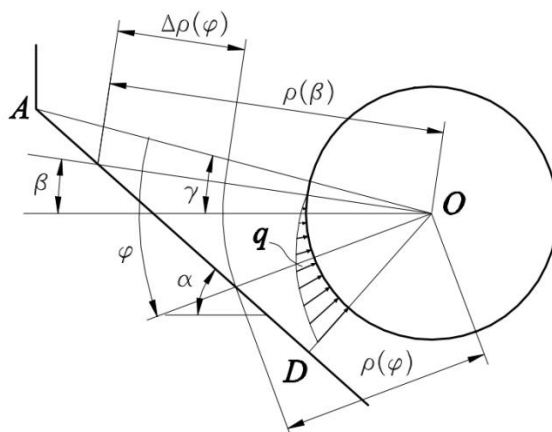


Рисунок 1.23 – Схема для расчета нагрузки

Получено выражение для определения силы действующей на ролик I :

$$F = \mu r b (h + r) \left(\frac{\pi/2 - \psi}{\sin \psi} + \ln \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \right), \quad (1.21)$$

где r – радиус ролика;

b – длина ролика;

$$\psi = \alpha - \gamma + \beta.$$

На основе анализа выражения 1.21 можно получить рациональные параметры проектируемого агрегата, но основной проблемой является определение коэффициента определяющего свойства материала μ , подробной методики которого для различных материалов не представлено.

Второй этап деформирования при измельчении характеризуется доминированием пластических деформаций, при которых основное разрушение происходит за счет относительного смещения частиц.

На основе ряда исследований [29, 40, 41, 46–48, 102, 104, 105, 113, 120] были предложены функции описывающие поверхности текучести, а также пластического потенциала при разрушении горных пород. Предельные поверхности разрушения, полученные на основе таких функций, представляются поверхностями, описывающими предел прочности твердого тела (горной породы), которые определяются критерием Кулона. Также было установлено, что

имеется прямая аналогия для представленного критерия пластического деформирования горной породы с известным критерием Мора. Предлагаемые зависимости могут использоваться как основные параметры оценки прочности горной породы на срез на основе сцепления и угла внутреннего трения. В работах указанных авторов показано сравнение предлагаемого ими критерия пластичности горной породы с полученными экспериментальными данными в условиях объемного сжатия. Для предельного состояния предложенные выражения принимают вид известного критерия пластичности Треска-Сен-Венана.

Следовательно, при измельчении слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, для материала, находящегося в условиях предварительного уплотнения и всестороннего сжатия, можно (исходя из исследований ряда авторов) сделать вывод, что выражения, полученные для жесткого идеально-пластического материала применимы для решения поставленной задачи. Таким образом, для предварительного анализа процесса измельчения слабых горных пород с учетом тангенциальных сил можно использовать приближенный энергетический метод [2, 106].

Энергетический метод расчета контактных напряжений основан на использовании экстремальных позиций теории пластичности, которые состоят в том, что действительные поля линий скольжения деформируемого пластически материала заменяется относительно простыми кинематически возможными полями, которые состоят из отдельных жестких элементов – блоков, удовлетворяющих граничным условиям как в скоростях, так и перемещениях. На рисунке 1.24 представлены поля линий скольжения и план скоростей движения блоков при сжатии толстой пластины между двумя плоскими поверхностями.

Поле линий скольжения и план скоростей являются взаимными диаграммами Максвелла. Следовательно, для получения плана скоростей применимы обычные методы графостатики, при этом выполнение соответствующих условий перемещений достигается автоматически.

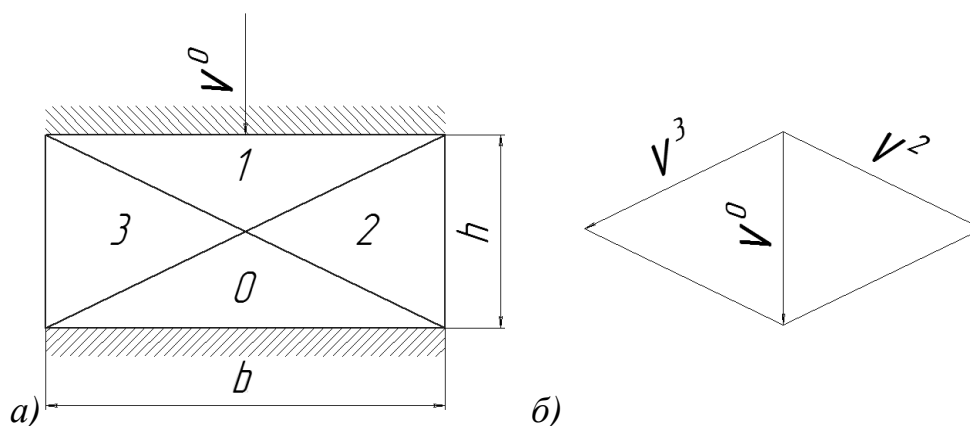


Рисунок 1.24 – Возможные поля линий скольжения жестких блоков (а) и соответствующий план скоростей их движения (б) при пластической деформации толстой пластины

Мощность, которая необходима для реализации такой схемы деформирования, превышает реальную мощность внутренних действующих сил при пластическом течении. Соответственно, удельные усилия, рассчитанные при помощи данного метода, являются их верхней оценкой.

Мощность, развиваемая внутренними силами w_i , определяется в соответствии с принятым кинематически возможным полем, которое состоит из некоторых жестких блоков, и равна мощности, развиваемой на поверхностях, вдоль которых имеют место разрывы скоростей величиной v_i :

$$w_i = k \int_f v_i df_i, \quad (1.22)$$

где k – пластическая постоянная материала (предел текучести при сдвиге);

v_i – скорость относительного перемещения соседних блоков;

f_i – площадь поверхности скольжения между двумя блоками.

Мощность внешних сил w_0 при поступательном движении инструмента, осуществляющего пластическое деформирование, равна:

$$w_0 = qf_0v_0 - 2\mu k \int_f v_j df_j, \quad (1.23)$$

где q – удельное усилие на поверхности деформирующего инструмента;

f_0, f_j – площадь контакта между материалом и инструментом, где возникают силы трения;

v_j – величина разрыва скорости на площади f_j ;

μ – коэффициент трения;

v_0 – скорость поступательного движения инструмента.

Так как процесс измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, между двумя вращающимися валками аналогичен прокатке, то для определения необходимой для этого процесса мощности можно использовать известные выражения, полученные для деформирования металлов [2].

Используя выражение (1.22) и (1.23) из условия равенства мощностей внешних и внутренних сил находим:

$$\frac{q}{2k} = \frac{\int_{f_1}^1 v_i df_i + 2\mu \int_{f_j}^1 v_j df_j}{2f_0 v_0}, \quad (1.24)$$

при условии плоской деформации $f_i = l_i t$; $f_j = l_j t$; $f_0 = bt$,

где q – давление на рабочие поверхности;

k – пластическая постоянная материала;

f_i , f_j , f_0 – площади поверхностей, соответственно: скольжения между блоками, между деформируемым материалом и рабочими поверхностями агрегата, где происходит внешнее трение, подвижной контактной поверхности;

l_i и l_j – длина площадок скольжения в плоскости деформации;

t – размер площадок в перпендикулярном направлении;

b – ширина проекции контактной площадки на плоскость, перпендикулярную направлению движения инструмента.

Если b и v_0 принять за единицы длины и соответственно скорости, то удельное усилие при условии плоской деформации будет определяться по формуле:

$$\frac{q}{2k} = \frac{\sum_i v_i l_i + 2\mu \sum_j v_j l_j}{2}, \quad (1.25)$$

где l_i , l_j и v_i , v_j представляют собой безразмерные длины и скорости, величины которых могут быть достаточно легко определены для принятого кинематически возможного поля и соответствуют плану скоростей.

Мощность внешних сил при прокатке можно определить из представленных выражений:

$$w_0 = q \Delta h v_k, \quad (1.26)$$

где $\Delta h = h_1 - h_2$ – абсолютное сжатие;

h_1, h_2 – высота сечения до и после прокатки;

v_k – окружная скорость (рисунок 1.25);

q – давление на валки.

Из равенства мощностей внешних и внутренних сил находим для условия плоской задачи:

$$\frac{q}{2k} = \frac{v_{12} l_{12} + v_{23} l_{23} + 2\mu(v_k - v_{02}) l_{02}}{\Delta h v_k}, \quad (1.27)$$

где v_{02}, v_{12}, v_{23} – соответствующие разрывы скоростей между жесткими блоками;

l_{02}, l_{12}, l_{23} – соответствующие длины линий скольжения между блоками.

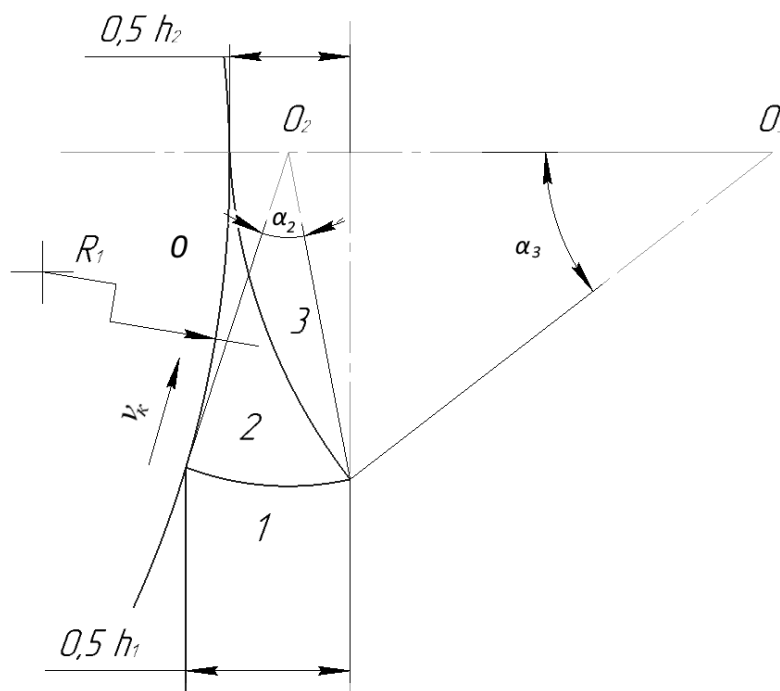


Рисунок 1.25 – Кинематически возможное поле линий скольжения при прокатке листа

Соотношение скоростей v_k и v_{02} зависит от опережения при прокатке. При условии отсутствия опережения можно использовать подобие полей линий скольжения, а также соответствующего плана скоростей, и определить давление по выражению:

$$\frac{q}{2k} = \frac{\alpha_2 R_2^2 + \alpha_3 R_3^2 + 2\mu l_{02} R_3}{\Delta h (R_1 + R_3)}, \quad (1.28)$$

где R_1 – радиус прокатных валков, R_2 и R_3 – радиусы кривизны соответствующих линий скольжения, α_2 и α_3 – соответствующие углы поворота радиусов кривизны [2].

Выводы по главе 1

По результатам исследования и изучения базовой технической, научной и патентной литературы можно сделать вывод о том, что измельчение горных пород происходит в основном за счет сил сжатия, которые разрушают дробимый элемент породы под действием нормальных напряжений. Кроме того, затраты энергии на измельчения кратно больше на стадии помола. Чтобы при измельчении материала уменьшить расход энергии необходимы условия, при которых на измельчаемую горную массу действовали бы как нормальные, так и касательные напряжения.

В рамках главы представлены источники научной и технической литературы, где описываются разнообразные способы измельчения и классификации горных пород с использованием различных по конструкции и воздействию на измельчаемый материал машин. Однако представленные машины имеют ряд недостатков при измельчении слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами. Потому **цель работы** заключается в повышении эффективности измельчения на стадии грубого помола слабых горных пород за счет обоснованного выбора рациональных параметров измельчителя-классификатора (агрегата) на основе анализа установленных закономерностей взаимодействия его рабочих органов с перерабатываемой горной породой.

Идея работы заключается в формировании комбинированных усилий со стороны рабочих органов измельчителя-классификатора в зоне разрушения с одновременной классификацией и отводом готового продукта, за счет чего повышается эффективность процесса переработки на стадии грубого помола слабых горных пород.

Для достижения цели сформулированы **задачи исследования:**

– разработать принципиальную схему измельчителя-классификатора, позволяющего разрушать горные породы слабой прочности методом комбинированного нагружения на основе разницы скоростей рабочих поверхностей агрегата с одновременным отводом готового продукта;

– разработать теоретическую модель процесса разрушения горной породы, обладающей пластическими свойствами, находящейся в рабочей зоне измельчителя-классификатора, с учетом влияния конструктивных особенностей агрегата и физико-механических свойств разрушаемой горной породы;

– установить зависимости производительности измельчения от конструктивных и режимных параметров измельчителя-классификатора, на основе анализа которых может быть достигнута максимальная эффективность переработки горных пород слабой прочности;

– разработать методику определения рациональных параметров измельчителя-классификатора с высокой производительностью и низкими энергетическими затратами при переработке горных пород слабой прочности, обладающих пластическими свойствами.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ-КЛАССИФИКАТОРЕ

2.1 Разработка конструкции измельчителя-классификатора

Достаточно эффективная схема дробления реализуется, если активные рабочие поверхности измельчающего оборудования производят движения, приводящие к совместному сжатию и сдвигу. Одновременное действие касательных и осевых сил существенно улучшают эффективность процесса измельчения. Следовательно, разработка оборудования для измельчения на стадии грубого помола слабых горных пород с помощью комбинированного нагружения, является актуальной задачей.

Недостатком существующих технологий измельчения является то, что в процессе дробления возникают частицы различной дисперсности. При этом есть такие, размер которых не требует дальнейшего разрушения, при этом они остаются в зоне измельчения и принимают на себя существенную часть нагрузки, что приводит к потерям части энергии, затрачиваемой на разрушение, переизмельчению продукта, и замедляет процесс измельчения крупных кусков породы [1,68, 69, 107, 136].

При наличии в измельчаемой горной массе частиц, имеющих размеры, не нуждающиеся в дальнейшем измельчении (что приводит к снижению эффективности процесса измельчения), в конструкции разрабатываемых устройств необходимо предусмотреть возможность отведения таких частиц в процессе работы, например, с использованием принципа барабанного грохота [3, 7, 116, 129].

Горные породы средней и слабой прочности в настоящее время в большинстве случаев измельчают с помощью двухвалковых дробилок с гладкими валками, при этом для захвата крупных элементов породы их размеры должны быть значительными (для элемента величиной 75 мм валок 1500 мм) [83]. В

основе типовых методик определения параметров рассматриваемых валковых дробилок находится определение угла оптимального захвата материала, который зависит от наибольшего размера куска исходной породы, коэффициента трения с валками, диаметра валков, скорости их вращения, а также мощности привода [10].

Угол захвата дробимого материала для валковых дробилок α – это некоторый угол, рассматриваемый между двумя расположенными по касательной к рабочим поверхностям валков в точках контакта с дробимым куском. Для гарантированного захвата куска породы между валками нужно, чтобы было выполнено условие $\alpha < 2\varphi$, где φ – соответствующий угол трения между дробимым материалом и валками. Для каменных материалов (при коэффициенте трения между рабочим органом и породой $f = 0,3$) $\varphi = 16^\circ 40'$, значит предельный угол $\alpha_{\text{пред}} = 2\varphi = 33^\circ 20'$. В практических расчетах принимают $\alpha = 15^\circ \dots 23^\circ$.

Если за основу конструкции измельчителя-классификатора взять барабанную стержневую мельницу [51], а вместо стержней установить вал-измельчитель, то получится аналог валковой дробилки, у которой угол захвата будет значительно меньше, чем у типовых измельчителей. Очевидно, что угол захвата в измельчителе-классификаторе, изображенном на рисунке 2.1, будет находиться в большинстве случаев в рекомендуемых пределах.

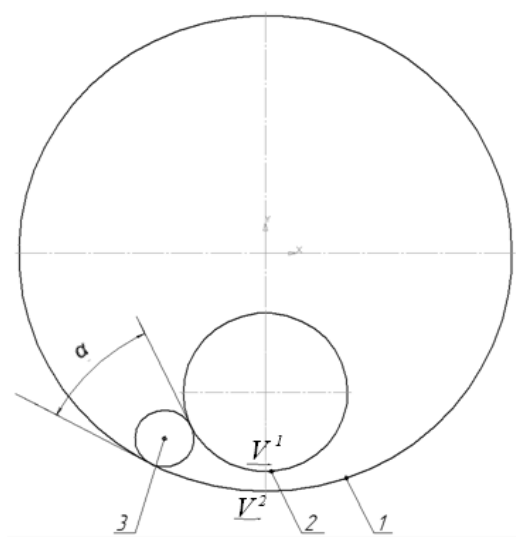


Рисунок 2.1 – Схема дробления крупного фрагмента в измельчителе-классификаторе: 1 – барабан мельницы; 2 – вал-измельчитель; 3 – крупный фрагмент породы

Если V_1 тангенциальная скорость вала-измельчителя и V_2 тангенциальная скорость перфорированного барабана отличаются, то одна из сторон фрагмента породы движется быстрее другой, что приводит к переориентации его расположения так, что он разворачивается и затягивается меньшей стороной, что способствует минимизации прилагаемых сил.

На основе анализа типового дробильно-сортировочного оборудования была разработана принципиально новая конструкция «Измельчителя-классификатора» (патент № RU2531438 С2, приложения Б и В) [12, 13, 81, 142, 144], представленная на рисунке 2.2.

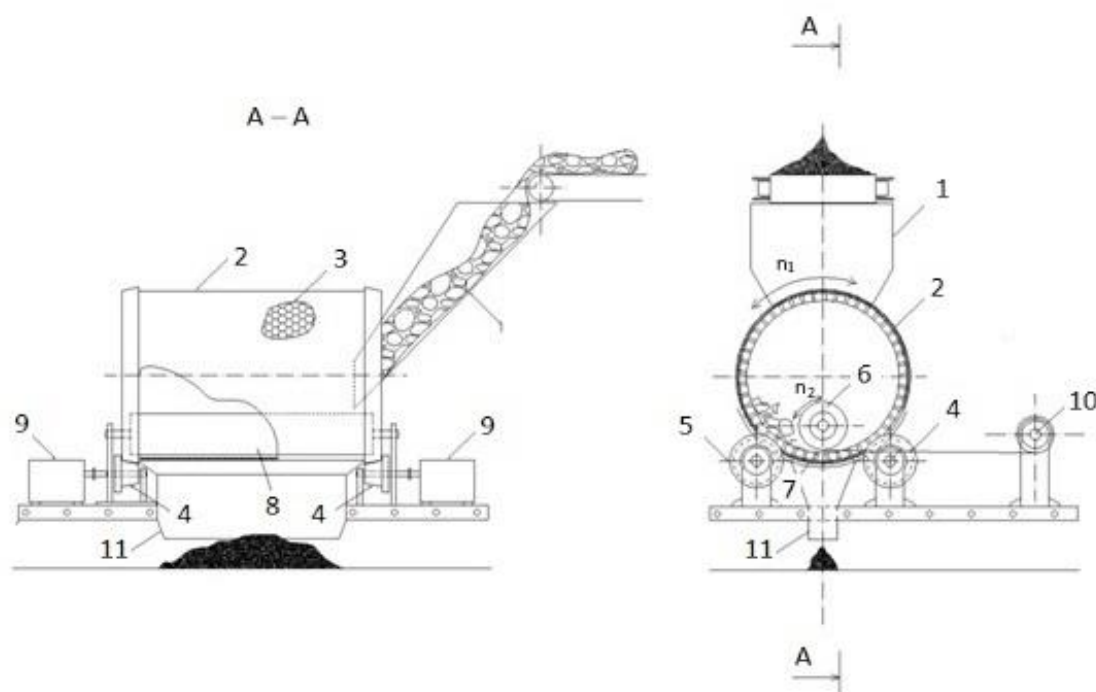


Рисунок 2.2 – Схема измельчителя-классификатора

Данное конструкторское решение позволяет совместить процессы измельчения и классификации в одном агрегате, минуя конвейерную перегрузку. Принцип воздействия на измельчаемый материал и технологические особенности данного агрегата позволяют применять его для измельчения слабых горных пород.

Измельчитель-классификатор работает следующим образом: предварительно подготовленный по размеру к измельчению в данном агрегате исходный материал, через загрузочное устройство 1 попадает на внутреннюю

поверхность перфорированного барабана 2, вращающегося и опирающегося на приводные 4 и поддерживающие 5 ролики.

Окружная скорость перфорированного барабана 2 отличается от окружной скорости вала-измельчителя 6 за счет использования индивидуальных приводов 9 и 10. Поступающая в зазор 7 между валом-измельчителем 6 и перфорированным барабаном 2 горная порода подвергается высокоэффективному измельчению и через отверстия перфорированного барабана 3 попадает в разгрузочное устройство 11.

Повышенная эффективность разрушения достигается за счет разницы в окружных скоростях вращающегося барабана с перфорацией и вала-измельчителя, вследствие чего измельчаемый материал подвергается одновременно как сжимающим (нормальным), так и сдвиговым (тангенциальным) напряжениям.

Кроме того, разница в окружных скоростях барабана с перфорацией и вала-измельчителя приводит к появлению различных направлений движения отдельных слоев материала относительно друг друга, что положительно влияет на процесс разрушения и классификации. Использование на внутренней поверхности перфорированного барабана и поверхности вала-измельчителя футеровок с повышенными фрикционными свойствами относительно измельчаемого материала, позволяет создать условия, при которых внешнее трение будет превышать внутреннее в слое, что положительно скажется как на процессе разрушения, так и на процессе классификации.

Из теории и практики грохочения известно, что материал с размером частиц меньшим или равным $0,85\beta$ (где β – размер отверстия просеивающей поверхности) является легкогрохотимым, а при большем или равным $0,85\beta$ – трудногрохотимым, поэтому размер соответствующих отверстий в корпусе барабана должен отвечать условию облегченного грохочения.

Исходя из условий рационального характера измельчения, необходимо воздействовать на материал, как сжатием, так и растяжением, изгибом и сдвигом с максимально возможными градиентами напряжений. Очень важно также

вовремя отводить из зоны измельчения готовый продукт соответствующей фракции, поэтому возникает необходимость в создании принципиально нового устройства (агрегата), позволяющего реализовывать разрушение горных пород комбинированным способом воздействия сжимающих и сдвигающих усилий со значительно меньшей металлоемкостью. В связи с этим разработана конструкция измельчителя-классификатора, позволяющего разрушать горную массу указанным выше методом на основе использования разницы скоростей рабочих поверхностей с перманентным удалением кондиционного продукта [81]. Кроме того, применение сменных рабочих рельефных накладок на поверхности вала-измельчителя позволяет интенсифицировать процесс разрушения за счет повышенных удельных напряжений при контакте с разрушаемым материалом. Рельеф и размер рабочих накладок выбирается исходя из конкретных физико-механических свойств материала. Так, например, для хрупких горных пород и материалов рекомендуется применять гладкую поверхность накладки вала-измельчителя, или снабженную полусферами, расположенными в шахматном порядке, для вязких и пластичных – накладки, выполненные в виде винта или штырей, расположенных в шахматном порядке [13]. Расположение элементов в шахматном порядке обусловлено увеличением рабочей поверхности вала-измельчителя.

Таким образом, применение «Измельчителя-классификатора» для переработки слабых горных пород позволит не только повысить эффективность измельчения и классификации, но и снизить энергоемкость этих процессов.

2.2 Разработка теоретической модели процесса измельчения слабых горных пород в измельчителе-классификаторе

До проведения эксперимента на конкретном материале, важно с помощью известных математических выражений [22, 34, 51, 57] определить верхнюю границу усилия достаточного для осуществления процесса измельчения в

условиях лабораторных исследований. Рассчитанное таким образом усилие необходимо для определения силовых и конструктивных параметров специального устройства, разрабатываемого для моделирования процесса измельчения и классификации слабых горных пород [50, 72].

В предлагаемом методе измельчения и классификации [81] используется вал-измельчитель, установленный внутри перфорированного барабана (рисунок 2.2), которые при вращении осуществляют измельчение горной породы с одновременным просеиванием готового продукта через отверстия установленного размера в перфорированном барабане.

В представленной задаче, измельчение материала, обладающего пластическими свойствами, происходит сложное пластическое течение, которое можно охарактеризовать неоднородными полями скоростей, деформаций, напряжений и граничными условиями. Представление о рассматриваемом процессе может быть основано на основе результатов эксперимента, моделирующего процесс измельчения [93–95, 97, 100, 101, 110, 112, 123] и расчетно-аналитическим путем [61–63]. Решение систем уравнений, описывающих движение и свойства измельчаемого материала, могло бы дать достаточно полную картину процесса пластического течения. Однако математические трудности приводят к необходимости установления некоторых допущений:

- деформируемый материал считается жестко-идеально-пластичным;
- соблюдаются условия пластичности (критерий Треска);
- принятые для расчетов схемы полей скольжения не должны противоречить напряженному состоянию исследуемого материала;
- должны соответствовать дифференциальным зависимостям равновесия [2, 106];
- должны соответствовать параметрам напряженного состояния включая границы сечений деформируемого тела.

Эти условия исходят из того, как формируются направления линий скольжения в соответствующей точке, а также на внешней границе контура, и

должны совпадать с основным направлением вектора главного касательного напряжения.

Представленные допущения, позволяют рассчитать мощность, необходимую для такой деформации, используя известные выражения, полученные для идеально-жестко-пластической среды. Это позволяет провести предварительный анализ процесса измельчения слабых горных пород и получить исходные данные для разработки лабораторной установки.

В связи с этим решение становится менее общим, но может быть использовано для конкретной задачи.

При измельчении слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, возникает сложное нагружение, которое характеризуется развитым пластическим течением. В таких условиях пластические деформации велики по сравнению с упругими деформациями, и последними можно пренебречь. Большое количество минералов, подвергаемых измельчению (гипс, мел, тальк, каолинит, серпентинит и др.) имеют пластические свойства. Это позволяет после уплотнения на первом этапе измельчения представить его, в виде жестко-идеально-пластичной среды, которая обеспечивает пластическое течение фактически при неизменном напряжении k (при условии сдвига), а также напряжении Y (при условии растяжения или сжатия) [2, 106].

При решении задачи по измельчению слабых горных пород можно применить известные зависимости, полученные на основе энергетического метода расчета для решения плоской задачи, тогда для определения основных параметров деформации необходимо построить возможное поле линий скольжения, соответствующее условиям рассматриваемого процесса [2]. На основе анализа полученных расчетных схем для полей скольжения и известных закономерностей для плоской задачи в процессе прокатывания пластины из материала, свойства которого можно представить, как идеально-жестко-пластическую среду, для которой теоретически можно получить величины контактных давлений на рабочие поверхности измельчителя-классификатора.

Решение представленных задач проводилось в два этапа:

– первый этап – предварительное уплотнение измельчаемой среды, при котором крупные фрагменты породы частично разрушаются на локальных участках и уплотняются с мелкими фрагментами породы, формируя единый массив (затраты энергии на этот процесс несоизмеримо меньше, чем на процесс непосредственного измельчения, поэтому в теоретической модели этот этап рассматриваться не будет);

– второй этап – определение давления на рабочую поверхность вала-измельчителя в процессе измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами.

Если проводить анализ измельчения внутри перфорированного барабана рабочим органом в виде вала-измельчителя с помощью энергетического метода расчета, то нужно разработать расчетную модель процесса, соответствующую условиям деформации измельчаемого материала. На рисунке 2.3 представлена модель процесса измельчения горной породы в перфорированном барабане валом-измельчителем.

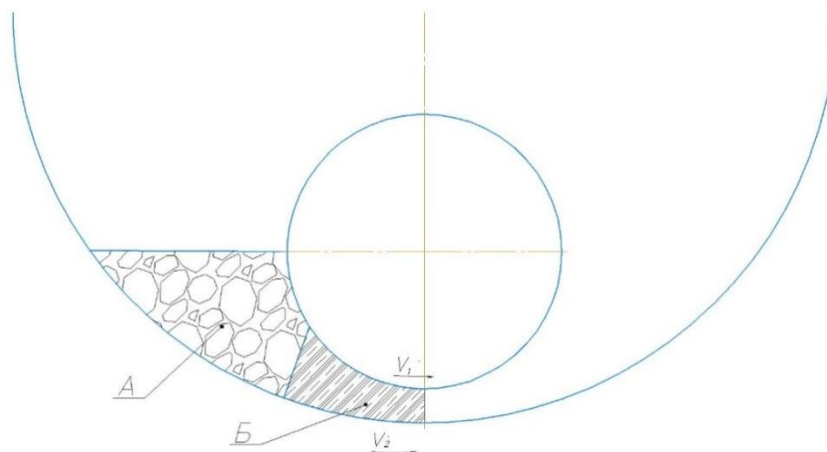


Рисунок 2.3 – Модель процесса измельчения горной породы в перфорированном барабане валом-измельчителем

Условно, рабочее пространство, в котором происходит измельчение, можно разделить на две зоны:

– зона *A* соответствует объему, в котором происходит уплотнение материала и частично пластически и упруго деформируются менее прочные фракции;

– зона B представляет собой уплотненную среду, в которой за счет пластической деформации происходит интенсивное измельчение горной породы.

Для получения кинематически возможного поля линий скольжения разобьем зону B на блоки, аналогичные полученным при прокатке толстой полосы [2, 32].

Если тангенциальные скорости перфорированного барабана V_2 и вала-измельчителя V_1 будут равны, то зону B можно представить в виде возможного поля линий скольжения, которое ограничивается областью пластической деформации протяженностью b между двумя плоскостями, расположенными под углом γ и движущимися навстречу друг к другу – зазор между валом-измельчителем, а также перфорированным барабаном. Скорость изменения зазора V^s можно выразить через расстояние S ($s-s_1$ – разница зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем в начале и в конце зоны B), отнесенное к времени поворота перфорированного барабана на угол ω соответствующий длине сектора зоны B . (рисунок 2.4).

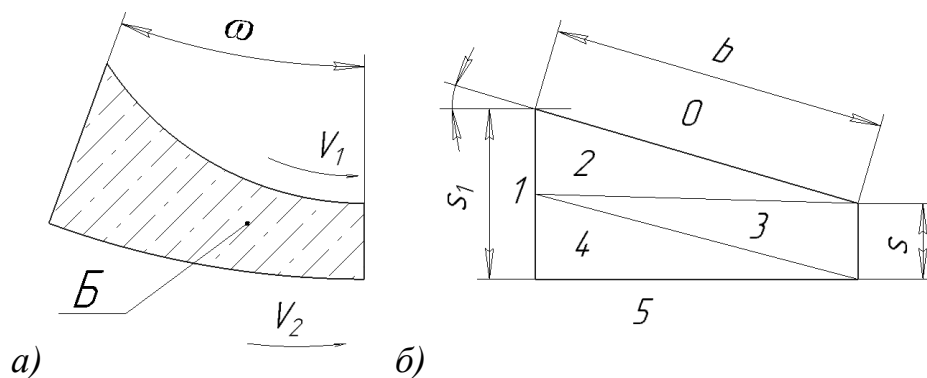


Рисунок 2.4 – Зона пластических деформаций B (а) (см. рисунок 2.3), возможное поле линий скольжения жестких блоков в зоне B (б)
0–5– номера блоков, при отношении $b/s = 5$

Для приближенной оценки усилия на контактной поверхности вала-измельчителя используем энергетический метод расчета [2].

На рисунке 2.4, б представлена схема кинематически возможного поля линий скольжения, которое состоит из жестких блоков, позволяющая определить давление необходимое для разрушения породы при условии одинаковых тангенциальных скоростей барабана с перфорацией и вала-измельчителя.

Для определения исходных данных для расчета давления на рабочей поверхности вала-измельчителя примем за единицу скорость уменьшения зазора V^s , величины разрывов скоростей между жесткими блоками определим как доли от этой величины, а длину линий скольжения выразим через значение b .

При отсутствии проскальзывания деформируемого материала относительно рабочих поверхностей барабана с перфорацией и вала-измельчителя выражение (1.24) примет вид:

$$\frac{q}{2k} = 0,5 \sum_i^1 v_i l_i, \quad (2.1)$$

где l_i и v_i представляют собой безразмерные длины и скорости, величины которых могут быть установлены из возможного поля и соответствующего плана скоростей (рисунок 2.5).

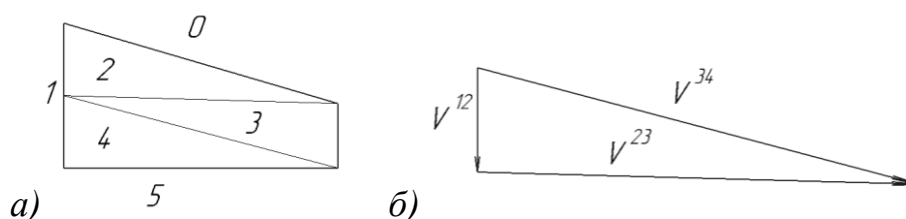


Рисунок 2.5 – Принятое кинематически возможное поле (а) и соответствующий план скоростей (б) при расчете контактного давления q на рабочую поверхность вала-измельчителя (при равных величинах V_1 и V_2)

Для принятых условий графоаналитически были получены значения разрывов скоростей v_i и длины линий скольжения l_i :

$$V^{12} = 1; V^{34} = 4,38; V^{23} = 4,23; V^{14} = 1.$$

$$l^{12} = 0,25; l^{34} = 0,99; l^{23} = 0,96; l^{14} = 0,25.$$

По формуле (2.1), с учетом того, что выражение получено для несимметричного поля для всех линий скольжения получим:

$$\frac{q}{k} = \frac{\sum_i^1 v_i l_i}{2} = \frac{V^{12} \cdot l^{12} + V^{23} \cdot l^{23} + V^{34} \cdot l^{34} + V^{14} \cdot l^{14}}{2}, \quad (2.2)$$

тогда

$$q = \frac{k(1 \cdot 0,25 + 4,23 \cdot 0,96 + 4,38 \cdot 0,99 + 1 \cdot 0,25)}{2} = 4,45k.$$

Аналогично было рассчитано давление на рабочие поверхности при изменении зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем (рисунок 2.6).

С уменьшением зазора давление на рабочую поверхность вала-измельчителя увеличивается, причем, при отношении b/s более 10 интенсивность роста снижается, так как пластическая деформация распространяется в сторону меньшего сопротивления, то есть в сторону обратную направлению движения измельчаемой массы.

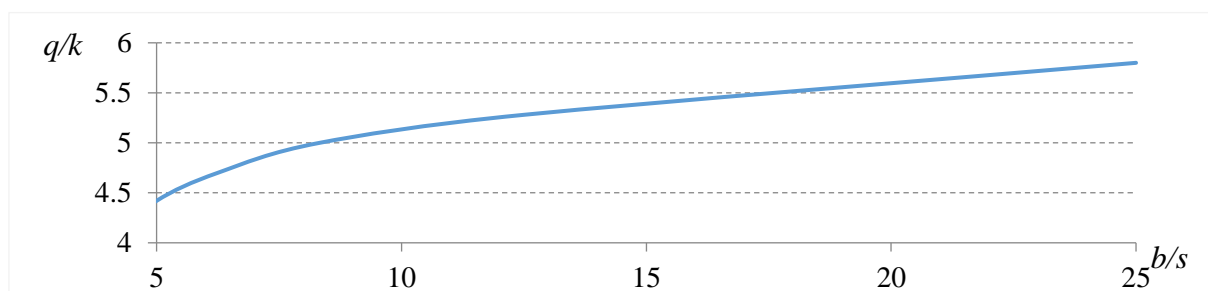


Рисунок 2.6 – Изменение давления q на рабочие поверхности при изменении зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем (b/s – отношение длины рабочей поверхности к величине зазора)

Если тангенциальная скорость вала-измельчителя V_1 выше тангенциальной скорости перфорированного барабана V_2 , то возникает относительная тангенциальная скорость V^x , с ростом которой меняется направление и величина результирующей скорости V^x , полученной сложением векторов скоростей V^{34} и V^{23} [5].

При условии $V_1 = 2V_2$ получим результирующую скорость рабочей поверхности вала-измельчителя V^x и соответствующий план скоростей (рисунок 2.7).

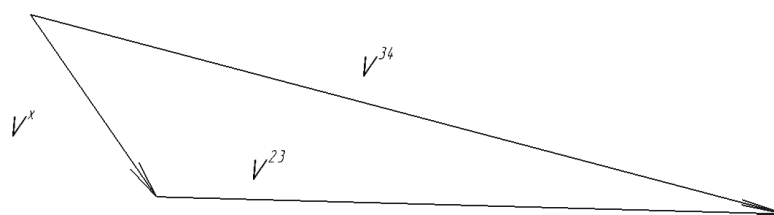


Рисунок 2.7 – План скоростей движения блоков при $V_1 = 2V_2$
 V^{34} – разрыв скоростей между блоками 3 и 4;
 V^{23} – разрыв скоростей между блоками 2 и 3

Если скорость V_1 будет в два раза больше скорости V_2 , то получим соответствующий план скоростей (рисунок 2.8).

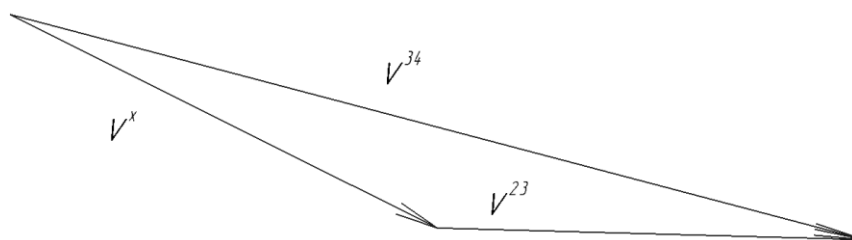


Рисунок 2.8 – План скоростей движения блоков при $V_1 = 2V_2$

Если скорость V_1 будет в три раза больше скорости V_2 , то получим план скоростей, по которому вектор скорости V^x совпадает по направлению с вектором скорости V^{34} , значит направление V^x совпадает с направлением вектора главных касательных напряжений. В этом случае получаем минимальное значение давления $q = 2,4k$. Если скорость V_1 будет в четыре раза больше скорости V_2 , то получим план скоростей, показанный на рисунок 2.9.

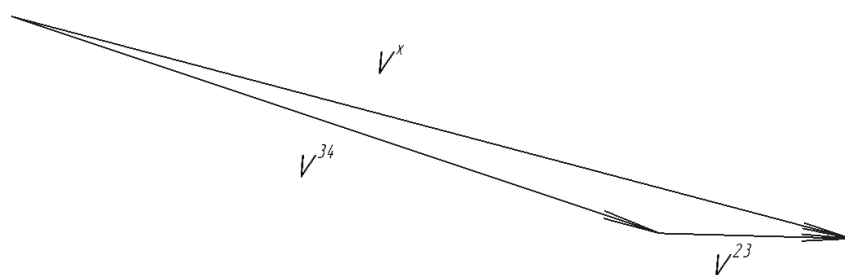


Рисунок 2.9 – План скоростей движения блоков при $V_1 = 4V_2$

Используя выражение (2.1), предложенное поле линий скольжения (рисунок 2.5) и планы скоростей, показанные на рисунках 2.6–2.9 была получена зависимость давления на рабочую поверхность вала-измельчителя (в значениях k – предел прочности на сдвиг) от величины отношения скорости V_1 к скорости V_2 (рисунок 2.10).

Полученная зависимость показывает, что при определенных соотношениях скоростей V_1 и V_2 можно добиться существенного снижения необходимой для измельчения мощности и проводить процесс более эффективно.

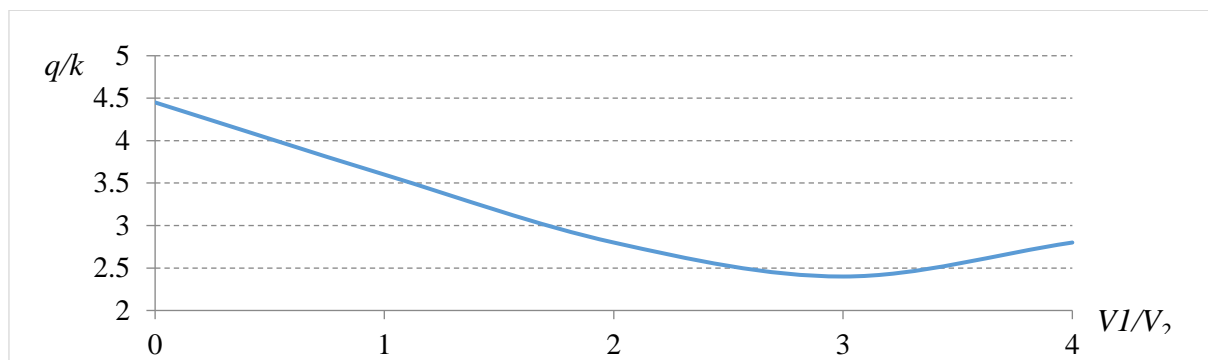


Рисунок 2.10 – Зависимость давления q на рабочую поверхность вала-измельчителя (в значениях k – предел прочности на сдвиг) от величины отношения скорости V_1 к скорости V_2

Еще одним фактором, влияющим на давление на рабочую поверхность вала-измельчителя, является высота столба поступающего на измельчение материала (рисунок 2.11). Этот параметр зависит от интенсивности подачи исходного материала в измельчитель-классификатор.

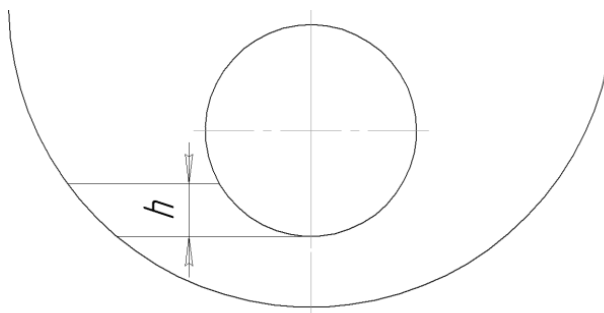


Рисунок 2.11 – Высота столба h поступающего на измельчение материала

В зависимости от высоты столба h измельчаемого материала увеличивается площадь контактной поверхности, и, как следствие, растет протяженность длины рабочей поверхности b и увеличивается сила, действующая на вал-измельчитель и перфорированный барабан. С увеличением этой силы растет мощность W , необходимая для процесса измельчения:

$$W = q \cdot l \cdot d \arccos\left(1 - \frac{2h}{d}\right) \cdot V^s, \quad (2.3)$$

где q – давление на рабочую поверхность вала-измельчителя;

l и d – длина и диаметр вала-измельчителя;

V^s – скорость изменения зазора S .

Зависимость относительной мощности W , необходимой для измельчения, от высоты столба h представлена на рисунке 2.12. Полученные значения скорости $V^s = 3dc^{-1}$ и равенства скоростей V_1 и V_2 , рассмотренные выше, обеспечат исследование основных параметров измельчения на лабораторной установке. Для расчетов использовались механические свойства мела с пределом прочности 1 МПа, что позволяет при использовании другого материала легко изменить результаты, умножив их на значение предела прочности этого материала на сжатие в МПа.

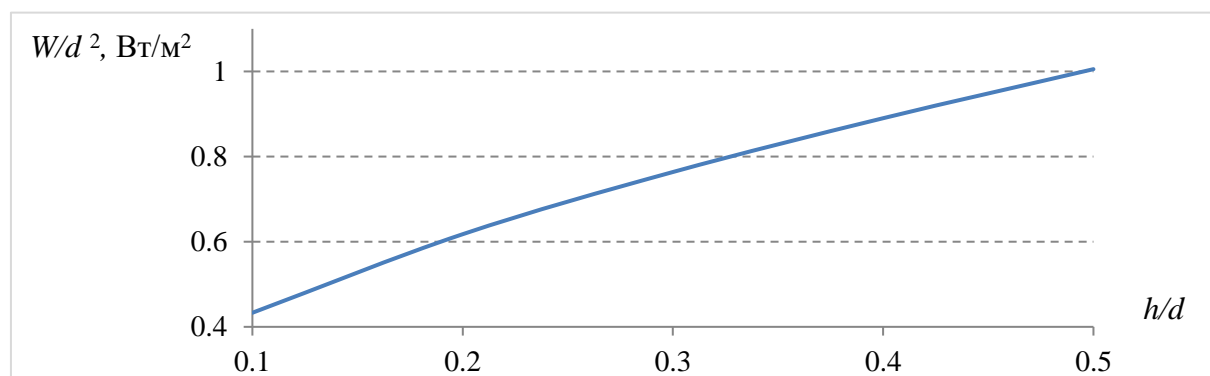


Рисунок 2.12 – Зависимость мощности W , отнесенной к квадрату диаметра d вала-измельчителя, необходимой для измельчения слабых горных пород от высоты столба h , отнесенной к диаметру вала-измельчителя

Используя материалы исследования, можно предположить, что для повышения эффективности процесса измельчения, высота столба h должна быть минимально необходимой для обеспечения подпитки зоны измельчения исходной породой.

Еще одним важным фактором теоретического исследования является получение теоретических зависимостей мощности, необходимой на процесс измельчения от различных параметров функционирования установки. Такие зависимости помогут выявить наиболее значимые параметры процесса измельчения с точки зрения повышения энергоэффективности данного процесса.

На рисунке 2.13 показана зависимость относительной мощности, затрачиваемой на измельчение, от величины зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем, полученная для значений скорости сближения $V^s = 3d c^{-1}$.

Полученная зависимость показывает, что с увеличением зазора s мощность необходимая для измельчения материала снижается, однако, вместе с этим снижается производительность [146] и степень измельчения. Установить конкретную связь между величиной зазора и степенью измельчения в данных условиях сложно, поэтому данная проблема будет решаться на этапе эмпирических исследований.

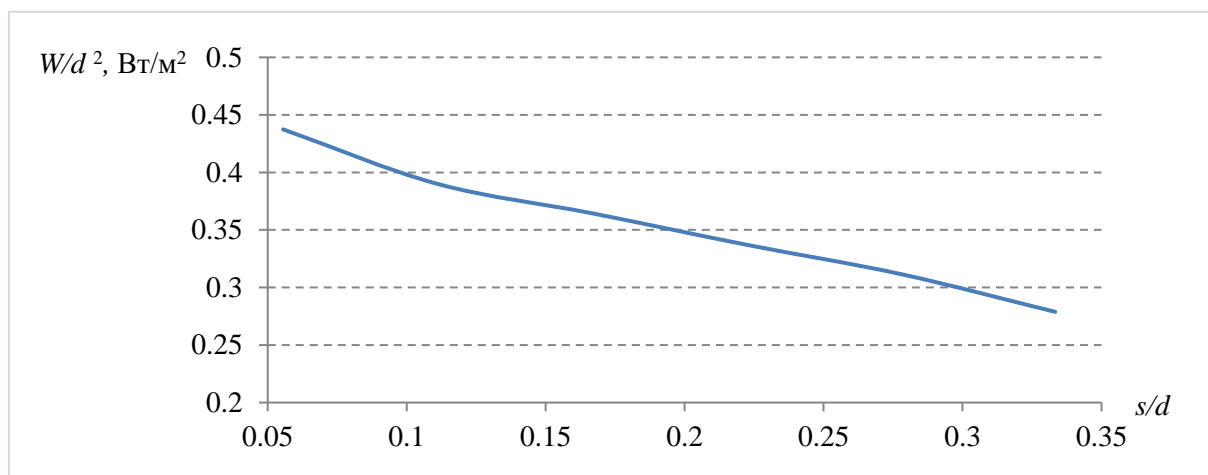


Рисунок 2.13 – Зависимость удельной мощности W/d^2 , необходимой для измельчения от величины зазора s между перфорированным барабаном и валом-измельчителем, отнесенной к диаметру вала-измельчителя

Повысить объемную производительность Q_o измельчения можно за счет увеличения скоростей вращения барабана с перфорацией и вала-измельчителя:

$$Q_o = \frac{\pi}{4} \omega_2 l ((D - s)^2 - (D - s_1)^2), \quad (2.4)$$

где ω_2 – угловая скорость вращения;

D – диаметр перфорированного барабана;

l – длина перфорированного барабана;

s, s_1 – наименьший и наибольший зазор между перфорированным барабаном и валом-измельчителем в зоне измельчения B .

На рисунке 2.14 показана относительная объемная производительность агрегата в зависимости от тангенциальной скорости (d – диаметр вала-измельчителя).

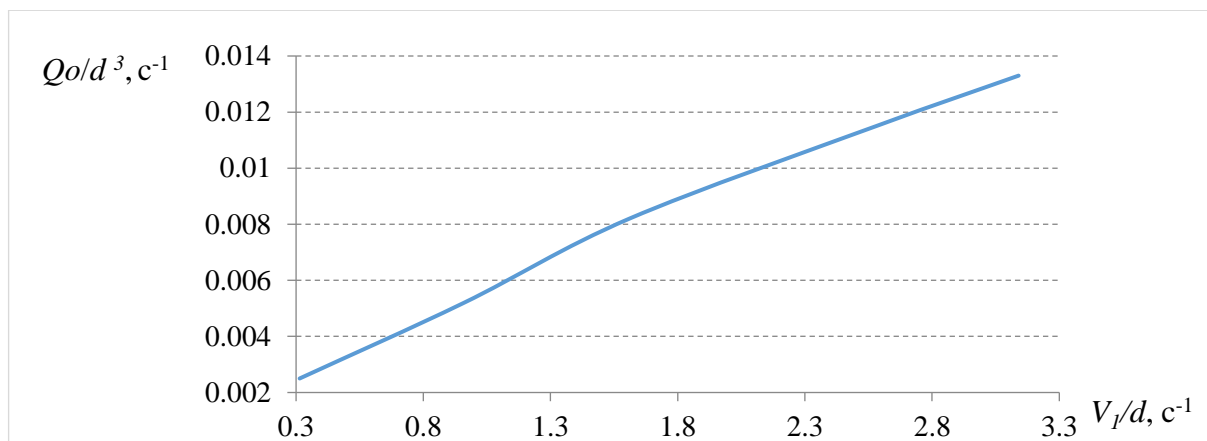


Рисунок 2.14 – Зависимость относительной производительности измельчения Q_o/d^3 от величины тангенциальной скорости вала-измельчителя, отнесенной к диаметру вала-измельчителя

Выводы по главе 2

Теоретический анализ процесса измельчения слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, с помощью энергетического метода расчета, показал:

1. Энергетическую эффективность процесса измельчения можно повысить за счет направления вектора суммарной скорости сближения рабочих поверхностей барабана с перфорацией и вала-измельчителя вдоль вектора главного касательного напряжения, соответствующего принятому полю линий скольжения. По результатам расчета давление на рабочие поверхности может быть снижено до двух раз при соотношении один к трем нормальной и касательной составляющих скоростей сближения рабочих поверхностей.

2. Снизить затраты энергии на процесс измельчения можно за счет увеличения зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем, но при этом может увеличиваться размер измельчаемых частиц.

3. Необходимо регулировать подачу измельчаемой породы таким образом, чтобы высота столба измельчаемого материала была минимально необходимой с точки зрения производительности процесса.

4. При разработке лабораторной установки необходимая мощность привода должна быть в пределах 0,8–1,2 кВт.

5. Привод лабораторной установки должен обеспечивать изменение скоростей вращения рабочих органов таким образом, чтобы тангенциальная скорость вала-измельчителя могла изменяться в два раза и более относительно тангенциальной скорости перфорированного барабана.

6. Конструкция лабораторной установки должна быть оборудована бункером-дозатором для изменения высоты столба поступающего материала.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ- КЛАССИФИКАТОРЕ

3.1 Разработка лабораторной установки для проведения эмпирических исследований процесса измельчения с помощью измельчителя- классификатора

Теоретические исследования процесса измельчения слабых горных пород позволили оценить влияние силовых параметров рабочих органов измельчителя-классификатора на количество материала, измельченного в зазоре между ними [131]. Однако, для определения количества проходящего сквозь отверстия барабана подрешетного продукта представляется необходимым выполнение стендовых исследований. Для этого была разработана принципиальная схема лабораторной установки (рисунок 3.1).

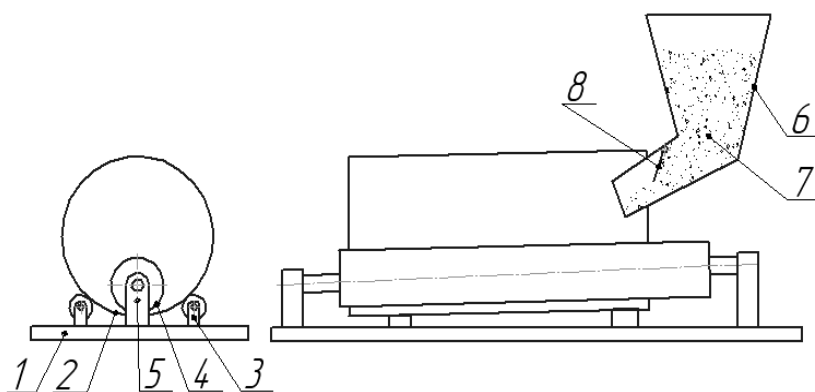


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема конструкции измельчителя-классификатора

Конструкция лабораторной установки аналогична конструкции измельчителя-классификатора (рисунок 2.2) и представляет собой основание 1 с перфорированным барабаном 2 установленным на опорные ролики 3. Внутри барабана расположен вал-измельчитель 4 установленный на регулируемых опорах 5. Барабан имеет перфорации для удаления измельченного материала из зоны измельчения. Для дозированной подачи исходного материала 7 используется

регулируемый бункер-дозатор 6 с регулируемой заслонкой 8.

Для решения указанных выше задач создан экспериментальный стенд (рисунок 3.2.).

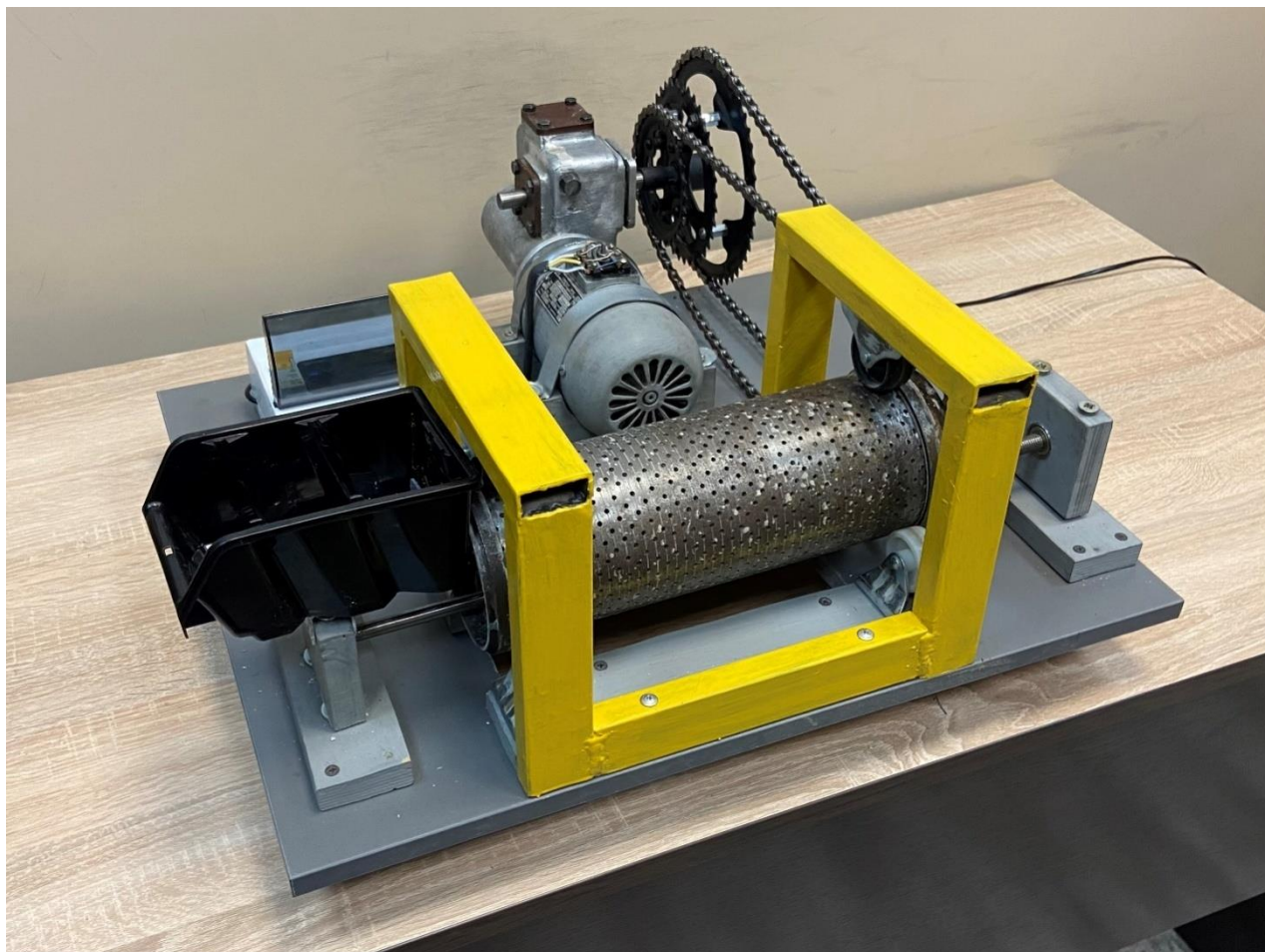


Рисунок 3.2 – Экспериментальный стенд

Стенд (лабораторная установка) представляет собой перфорированный барабан (диаметр отверстий 3 мм), установленный на станине с роликовыми опорами под углом 2° к горизонтальной поверхности [59, 60]. Внутренний диаметр перфорированного барабана составляет 103 мм, длина – 360 мм. Внутри перфорированного барабана расположен вал-измельчитель диаметром 36 мм, закреплённый с двух сторон в цапфах с возможностью изменения просвета между рабочими поверхностями агрегата. Вращение перфорированного барабана и вала-измельчителя осуществляется посредством двух ролико-пластинчатых цепей. На торцевой поверхности перфорированного барабана закреплён набор из 5 зубчатых звездочек, а на вале-измельчителе – из 6 зубчатых звездочек, необходимых для

изменения частот вращения перфорированного барабана и вала-измельчителя. На раме стенда установлен мотор редуктор мощностью 800 Вт с частотой вращения 2 мин⁻¹, на выходном валу которого закреплены приводные звездочки перфорированного барабана и вала-измельчителя.

Стенд работает следующим образом: мотор-редуктор вращает с постоянной скоростью звездочки перфорированного барабана и вала-измельчителя. Через торцевое отверстие перфорированного барабана на его внутреннюю поверхность из бункера-дозатора б (рисунок 3.1) производится подача подготовленного к измельчению материала, который затягивается в зазор между валом и внутренней поверхностью барабана, и сжимающими и сдвигающими усилиями разрушает. Далее продукт под размер перфорации уходит в разгрузочное устройство, тем самым происходит процесс классификации. В процессе работы установки, с помощью заслонки 8 (рисунок 3.1), регулируется подача исходного материала. В зависимости от скорости подачи исходного материала происходит регулирование высоты столба h подпора, величина которого определялась в процессе короткой остановки установки как среднее между высотой столба на входе установки и на выходе.

Основные технические характеристики лабораторного стенда приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики лабораторного стенда

Характеристика	Величина
1 Частота вращения выходного вала, об/мин	2
2 Мощность электродвигателя, кВт	0,8
3 Вращающий момент редуктора, Н·м	236,3
4 Частоты вращения вала-измельчителя, с ⁻¹	0,26–1,59
5 Частоты вращения перфорированного барабана, с ⁻¹	0–0,29

Представленная лабораторная установка позволит исследовать основные параметры процесса измельчения слабых горных пород в принятых условиях и отработать методику снижения энергозатрат на процесс измельчения.

3.2 Методика исследования

Для проведения экспериментальных исследований по измельчению слабых горных пород на лабораторном стенде, в качестве исходного материала, использовались гипс, тальк, мел, каолинит, серпентинит. В таблице 3.2 приведены некоторые параметры исследуемого материала [1, 8]. Основные исследования проходили на гипсе Г2, остальные материалы подвергались ограниченному исследованию для проверки сходимости результатов.

Таблица 3.2– Физико-механические характеристики исходного материала

Материал	Физико-механические свойства	
	Предел прочности при сжатии, $\sigma_{сж}$, МПа	Плотность, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Гипс Г2	2	1,45
Тальк	1	2,7–2,8
Мел ММ1	1	1,12–1,44
Каолинит	1–1,5	2,5–2,7
Серпентинит	2,4–3	2,5–2,7

Для проведения эмпирического исследования по измельчению слабых горных пород на необходимом качественном уровне важно иметь исходный материал в стабильном состоянии. В качестве основного материала использовался гипс Г2 ГОСТ125–2018, из которого формировался в соответствии с технологией приготовления материала монолитный брикет. Далее этот брикет подвергался крупному дроблению с последующей классификацией с помощью сит [70, 87, 89, 126]. Результаты классификации одной из проб представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3– Гранулометрический состав пробы

Состав	Размер сетки, мм									
	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,2	2,0	1,0
Остаток, %	0,0	64,2	10,0	8,3	2,6	4,0	3,5	3,5	2,3	1,2
Проход, %	100	35,8	90,0	91,7	97,4	96,0	96,5	96,5	97,7	98,8

Далее из классифицированного материала в соответствии с поставленными задачами эксперимента формировалась в необходимой пропорции исходная масса.

Процесс измельчения с одновременной классификацией изучен недостаточно, его эффективность во многом зависит от взаимно связанных параметров. Для рациональной организации эмпирических исследований с точки зрения снижения затрат, связанных с их проведением, применяются специальные математические методики целесообразного планирования экспериментов, позволяющие получить требуемую информацию об изучаемых процессах с минимальным количеством опытов на основе центрального композиционного ротатбельного равномерного планирования второго порядка (ЦКРУП ВР). Использование статистических методов анализа результатов экспериментов позволяет выявить основные функциональные связи между показателями процесса измельчения, и с необходимой точностью проводить прогнозирование их изменения [61, 103].

Исходя из принятых условий эксперимента, в матрицу планирования были включены следующие переменные в качестве исходных:

- частота вращения вала-измельчителя ω_1 ;
- частота вращения перфорированного барабана ω_2 ;
- величина технологического зазора s ;
- высота столба h поступающего на измельчение материала;
- содержание класса 0,3 мм в исходном материале α .

Диапазон варьирования изучаемых параметров выбирался на основе технической характеристики экспериментального стенда и результатов предварительных испытаний.

В исследованиях применялась следующая методика:

Первый этап – используя метод «крутого восхождения» были определены наиболее благоприятные комбинации значений ω_1 , ω_2 и s при неизменных параметрах h и α с анализом полученного отклика в рамках достигнутого с помощью ЦКРУП ВР оптимума.

Второй этап – определение рациональных границ значений s и α , где снова была использована методика нелинейного метода планирования при выявленных оптимальных значениях ω_1 , ω_2 и s .

Важнейшим и наиболее удобным оценочным показателем работы агрегата является производительность по подрешетному (готовому) продукту Q_{Γ} . Именно этот критерий выбран в качестве определяющего при установлении рациональных параметров работы агрегата.

Предварительные исследования показали, что производительность измельчителя-классификатора предложенной конструкции ограничивается величиной пропускной способности отверстий в перфорированном барабане, через которые проходит измельчённый материал. Измельчение исходного продукта производилось за три прохода. Фактически производительность установки по исходному материалу $Q_{ис.}$ выбиралась по условию заполнения объёма перфорированного барабана не выше уровня верхней точки вала-измельчителя и могла изменяться в пределах от 22 до 114 см³ в минуту. Производительность бункера-дозатора для подачи исходного материала регулировалась поворотом заслонки δ (рисунок 3.1). Изначально планировалось на корпусе бункера установить вибродвигатель для облегчения движения гонной массы, но впоследствии оказалось, что установка при работе создает виброакустические колебания достаточные для стабилизации этого процесса.

Диапазон изменения исследуемых факторов ω_1 , ω_2 и s определялся на основе предварительных исследований, проведенных с помощью лабораторной установки.

Производительность установки по готовому продукту Q_{Γ} оценивалась долей полученного материала с отфильтрованным установленным составом по остатку на ситах от общей массы пробы [126].

Гранулометрическая структура поступающей на измельчение породы выявлялась рассевом и определением доли в массе отдельных фракций по остаткам на ситах с размером ячеек (в миллиметрах) 0,071;0,09;0,2;0,315;0,63; 1,0;1,6 и 2,5. Массовая доля определялась с использованием лабораторных весов с

интервалом взвешивания до 1 кг. Для подготовки пробы применялся сушильный шкаф, лабораторный ситовой анализатор с виброприводом, комплект сит.

Масса пробы отбиралась в зависимости от наибольших размеров частиц по следующей формуле [3]:

$$m_{\text{Пр}} = 0,02d^2 + 0,5d, \quad (3.1)$$

где d – наибольший диаметр частицы, мм.

Гранулометрическая структура выявлялась так: предварительно высушенная проба в шкафу при $t = 200\text{--}250$ °С, взвешивалась и просеивалась. Частный остаток в граммах обеспечивал вычисление доли в общей массе частиц, выраженной в процентах:

$$X = \frac{m_0 \cdot 100}{m_{\text{Пр}}}, \quad (3.2)$$

где m_0 – масса остатка на сите в граммах;

$m_{\text{Пр}}$ – масса взятой пробы в граммах.

Высота столба h поступающего на измельчение материала и содержание класса 0,3 мм в исходном материале не подвергались изменению при проведении первого этапа эксперимента. Высота столба поступающей на измельчение породы h определена по итогам предварительных опытов по наибольшему значению без «завального» режима, при котором высота столба соответствует верхнему уровню вала-измельчителя.

Описание связей параметров измельчения-классификации можно представить выражением:

$$y = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^k \epsilon_i x_i + \sum_{i=1}^k \epsilon_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \epsilon_{ii} x_i^2, \quad (3.3)$$

где y – значение функции отклика;

$x_i x_j$ – нормированные отклонения исследуемых факторов;

$\epsilon_0, \epsilon_i, \epsilon_{ij}, \epsilon_{ii}$ – коэффициенты регрессии;

k – количество исследуемых факторов.

3.3 Исследование производительности установки по выходу готового продукта на основе метода ЦКРУП

В качестве основной функции отклика использовалась производительность лабораторного стенда по подрешетному продукту Q_r в процентах.

Изменение числа оборотов вала-измельчителя подбиралось комплектом сменных звездочек, поэтому было проведено двухфакторное исследование для оценки данных с поверхности отклика. На основном уровне были проведены несколько серий экспериментов и определена дисперсия опытов:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y})^2}{f}, \quad (3.4)$$

где y_{0i} – соответствующее значение отклика, полученное на i -ом уровне исследования;

\bar{y} – величина среднего значения откликов;

значение $f=n_0-1$ – количество принятых степеней свободы;

n_0 – число повторных измерений для соответствующего принятого уровня.

На основе результатов семи опытов для принятого уровня, дисперсия исследования была $\sigma_0^2 = 1,63$.

В таблице А.1(приложение А) представлены результаты первой ступени исследования ЦКРУП ВП для выявления оптимальной зоны значения y , полученного по условиям линейного приближения на основе метода «крутого восхождения». В таблице А.1, строки 6–13 показана принятая для исследования матрица планирования. На основе первых 8 экспериментов были определены коэффициенты регрессии для линейного уравнения по v_i и v_{ij} .

На основе анализа знаков перед полученными коэффициентами регрессии v_i было установлено, что с увеличением значения факторах x_i (кроме x_2) имеет место повышение функции отклика – количество полученного продукта. Следовательно, для дальнейшего роста функции отклика требуется увеличения факторах x_1 и x_3 , а фактор x_2 необходимо уменьшить.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась на основе вычисления доверительного интервала:

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha;n} \cdot \sigma_{ei}, \quad (3.5)$$

где t – значение критерия Стьюдента.

Для принятого уровня значимости 0,05 для количества опытов n равного 8 значение по таблицам для $t_{0,05;8}$ соответствует 2,31 [104]. Определена σ_{ei} – дисперсия, которая характеризует ошибку при расчете коэффициента регрессии:

$$\sigma_{ei} = \pm \sqrt{\frac{\sigma_0^2}{n}}, \quad (3.6)$$

Соответственно для принятых $t_{\alpha;n}$ и σ_{ei} по формуле (3.5) получено $\Delta b_i = \pm 0,45$.

Сравнение значения коэффициентов регрессии для принятого доверительного интервала показало, что принятые линейные коэффициенты b_i все статически значимы. Проверка значимости коэффициентов регрессии b_{ij} показала, что $x_i x_j$ нелинейные, и необходимо получение более сложного выражения, чем линейное. Следовательно, проверка адекватности принятого уравнения (3.3) без влияния последнего члена для первой части не требуется, так как поиск оптимальной области для проверки адекватности модели не обязателен, и можно продолжить поиск методом «крутого восхождения» в оптимальной области [103].

Для определения направления движения искомых значений в сторону роста выхода готового продукта, установлены значения шагов изменения для принятых факторов. Изменение фактора проводилось, если это было возможно, в соответствии с произведением их коэффициентов регрессии в соответствующем интервале варьирования при учете знака коэффициента.

«Единичный шаг» S_{ed} выбран в соответствии с возможностью изменения на $0,05 \text{ с}^{-1}$ частоты вращения вала-измельчителя и $0,04 \text{ с}^{-1}$ для перфорированного барабана, это связано со ступенчатым изменением рассматриваемых факторов. Шаг зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем получен на основе выражения:

$$\frac{v_1 J_1}{v_i J_i} = \frac{\Delta e d}{\Delta i}. \quad (3.7)$$

В таблице А.1 строка 1 используется для указания значений шагов для каждого из выбранных факторов.

При проведении опытов № 9, 10 и 11 выяснилось, что «крутое восхождение» на основе градиента линейного уравнения приводило к существенному увеличению выхода готового продукта, опыт №10 стал лучшим.

Следовательно, новая серия опытов должна проводиться в окрестностях лучшего опыта. Так как доля выхода фракций нужного класса растёт, значит можно говорить о приближении к оптимуму. Для изучаемых факторов для улучшения точности исследования были уменьшены интервалы варьирования.

Следующая серия опытов для «крутого восхождения» на поверхности отклика представлена в таблице А.1 строки 24–31. Также в этой серии экспериментов ($k = 3$), определена дисперсия опытов ($\sigma_0^2 = 1,23$ при 5 степенях свободы). Значение доверительного интервала для коэффициента регрессии Δv_i получен 0,91. На основе восьми опытов снова определены коэффициенты регрессии для линейного уравнения по v_i и v_{ij} , анализ результатов показал, что принятый коэффициент v_i статистически незначим.

Установлена значимость для коэффициента регрессии v_{ij} , что указывает на нелинейность анализируемого факторного. На основе представленной методики были определены значения для шагов других факторов (x_1 и x_2), после чего проведено еще 3 опыта этапа методом «крутого восхождения», соответственно, опыт № 21 был наиболее удачным по выходу готового продукта (85,2 %). Анализ результатов, представленных в таблице А.1 показал, что для исследуемой области значений получен оптимум, но для уточнения полученного результата лучше использовать математическое решение, основанное на нелинейном планировании (ЦКРУП ВП). На основе анализа результатов исследования определены значения и интервалы изменений для 3-х исследованных факторов (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Интервалы варьирования и уровни для 3-х изучаемых факторов

Изучаемые факторы	Частота вращения вала-измельчителя $\omega_1, \text{с}^{-1}$	Частота вращения перфорированного барабана $\omega_2, \text{с}^{-1}$	Величина технологического зазора $s, \text{мм}$
Основной уровень (О)	0,53	0,03	10
Интервалы варьирования (J)	0,05	0,03	5
Верхний уровень (+1)	0,58	0,06	15
Нижний уровень (-1)	0,48	0	5
Звездная точка $+\alpha$ (+1,682)	0,67	0,08	19
Звездная точка $-\alpha$	0,42	0	1

Количество звездных и нулевых точек определены по таблицам [103] и равны $2m = 6$; $n_0 = 6$. Таким образом, используя приведенную методику необходимо провести восемь экспериментов полного факторного исследования с дополнением шестью экспериментами для звездных точек и шесть исследований в центре исследуемой области. Таким образом, определенный план второго порядка предполагал 20 экспериментов.

Таблица А.2 (приложение А) представляет собой скорректированную матрицу для ЦКРУП ВП при исследовании 3-х факторов.

Так как матрица ЦКРУП является не ортогональной, то соответствующие коэффициенты регрессии необходимо определить из условий квадратичной модели по уравнениям [103].

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0 &= \frac{A}{n} \left[2\lambda^2 (m+2)S_0 - 2\lambda c \sum_{j=1}^n S_{jj} \right]; \\ \epsilon_j &= \frac{c}{n} S_j; \\ \epsilon_{jl} &= \frac{c^2}{n\lambda} S_{jl}; \\ \epsilon_{jj} &= \frac{A}{n} \left[c^2 [(m+2)\lambda - m] S_{jj} + c^2 (1-\lambda) \sum_{j=1}^n S_{jj} - 2\lambda c S_0 \right] \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

Где S_j , S_{jl} , S_{jj} и S_0 – суммы произведений y для соответствующих строк по каждому из столбцов матрицы планирования, которые вычисляются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} S_j &= \sum_{i=1}^n x_{ij} y_i; \\ S_{jl} &= \sum_{i=1}^n x_{ij} x_{il} y_i; \\ S_{jj} &= \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 y_i; \\ S_0 &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \right\}, \quad (3.9)$$

где λ , A и c – вспомогательные коэффициенты, которые определяются по выражениям:

$$\lambda = \frac{mn}{(m+2)(n-n_0)}, \quad (3.10)$$

$$A = \frac{1}{2\lambda[(m+2)\lambda - m]}, \quad (3.11)$$

$$c = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}, \quad (3.12)$$

Значения дисперсий для выявленных коэффициентов регрессии определены по уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\epsilon_0}^2 &= 2A\lambda^2(m+2)\frac{\sigma_0^2}{n}; \\ \sigma_{\epsilon_j}^2 &= \frac{c}{n}\sigma_0^2; \\ \sigma_{\epsilon_{jl}}^2 &= \frac{c^2\sigma_0^2}{\lambda n}; \\ \sigma_{\epsilon_{jj}}^2 &= \frac{A}{n}[(m+1)\lambda - (m-1)]c^2\sigma_0^2 \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

где σ_{ϵ_0} , σ_{ϵ_j} , $\sigma_{\epsilon_{jl}}$, $\sigma_{\epsilon_{jj}}$ – средние квадратичные отклонения при определении коэффициентов для свободного члена, а также линейного члена j -того фактора, и квадратичного члена и для взаимодействия;

$\sigma_0^2 = 0,3$ – дисперсия, полученная после эксперимента из уравнения (3.4) для принятых шести нулевых точек для основного уровня.

В таблице А.3 (приложение А) показаны определенные по выражениям (3.8), (3.13) и (3.5) значения статистических параметров исследования ЦКРУП (при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе опытов 20, и соответственно 13 степенях свободы, так как $f = 20 - 6 - 1$, критерий Стьюдента будет $t_{0,05;13} = 2,160$).

При сопоставлении полученных коэффициентов регрессии b_{12} , b_{13} , b_{23} было установлено, что они не обладают статистической значимостью для принятых доверительных интервалов.

После анализа ЦКРУП ВП выражение можно представить в виде:

$$y = 85,8 + 0,93x_1 + 2,77x_2 + 0,79x_3 - 1,74x_1^2 - 3,39x_2^2 - 0,94x_3^2, \quad (3.14)$$

Далее переходим к натуральным значениям по уравнению:

$$x_j = \frac{X_j - x_{0j}}{J}, \quad (3.15)$$

Раскрывая кодированные переменные X получаем формулу с исходными натуральными значениями:

$$Q_r = 194,17 + 756,36\omega_1 + 789,62\omega_2 + 0,0063s - 696,12\omega_1^2 - 4384\omega_2^2 - 0,0376s^2, \quad (3.16)$$

Применяя выражение (3.16) появляется возможность вычисления производительности дробилки по готовому продукту.

Адекватность принятой математической модели проанализирована через критерий Фишера (F -критерия).

$$F_{f_2:f_1} = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_0^2}, \quad (3.17)$$

где σ_{ad}^2 – значение дисперсии адекватности.

Для расчета σ_{ad} сложим расчетные и экспериментальные разности для производительности по готовому продукту из 20 опытов в соответствии с матрицей планирования на основе выражения:

$$S_R = \sum_{i=1}^n (y_{i_{расч}} - y_{i_{эксн}})^2, \quad (3.18)$$

и на основном уровне по выражению:

$$S_{R_0} = \sum_{i=1}^{n_0} (y_{0i} - \bar{y}_0)^2, \quad (3.19)$$

окончательно величину $\sigma_{a\partial}^2$ определим исходя из выражений (3.18) и (3.19):

$$\sigma_{a\partial}^2 = \frac{S_R - S_{R_0}}{f_2}, \quad (3.20)$$

где $f_2 = n - k' - (n_0 - 1)$. Для рассматриваемого случая значение k' – число статистически значимых коэффициентов регрессии – принято равное семи, соответственно f_2 равно восьми.

При сравнении значений F -критерия $F_{f_2:f_1} = 3,32$, полученного по выражению (3.20) со значением, полученным по таблицам $F_{f_2:f_1}^{табл} = 3,69$ [103] можно сделать вывод, что полученное уравнение регрессии (3.16) не опровергается и адекватно оценивает зависимости производительности Q_r установки для измельчения для рассмотренных факторов. Кроме того, частота вращения вала-измельчителя ω_2 , частота вращения перфорированного барабана ω_1 , величина технологического зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем s находятся в оптимальной области при соответствующих следующих значениях: $\omega_1 = 0,53 \text{ с}^{-1}$; $\omega_2 = 0,07 \text{ с}^{-1}$; $s = 10 \text{ мм}$. Данная область является центром для проведения следующей серии экспериментов.

3.4 Исследование влияния частоты вращения вала-измельчителя, частоты вращения перфорированного барабана и величины технологического зазора на объемную производительность по готовому продукту

После выявления области оптимума для поверхности отклика проведены дополнительные эксперименты для выявления взаимосвязей объемной производительности по подрешетному продукту от факторов ω_1, ω_2 и s , если два из них зафиксированы. Изменение исследованных факторов происходило в

интервале показателей, приближенных к оптимуму. В ходе опытов значения высоты столба h поступающего материала и содержание класса 0,3 мм в исходном материале α поддерживались постоянными.

Результаты исследований представлены на графиках зависимости производительности по подрешетному продукту от V_1 и s (рисунки 3.3–3.4).

На рисунке 3.3 указаны зависимости производительности Q_{Γ} по готовому продукту от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 .

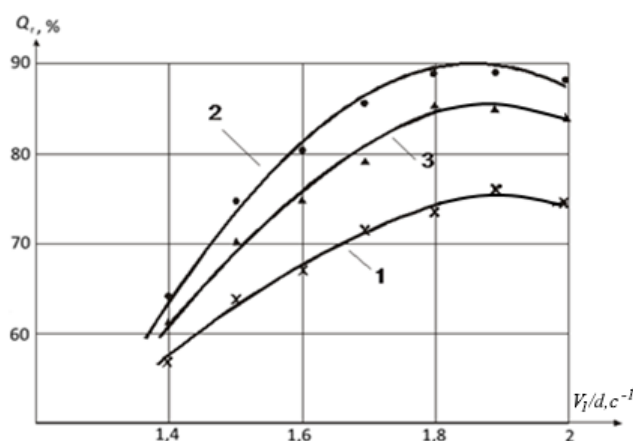


Рисунок 3.3 – Зависимость производительность по подрешетному продукту Q_{Γ} от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 ($\omega_2 = 0,17 c^{-1}$, при $s = 16$ мм – кривая 1, $s = 3$ мм – кривая 2, $s = 10$ мм – кривая 3)

Анализ результатов исследования показывает, что для получения рациональных значений параметров V_1 и s , найденных с помощью планирования экспериментов, для обеспечения максимальной производительности по подрешетному продукту 85 % достигается при частоте вращения вала-измельчителя более $\omega_1 = 0,53 c^{-1}$ (соответствует значению $V_1 = 1,8d c^{-1}$ на графике, рисунок 3.3), что подтверждает ранее проведенные исследования. Изменение тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 при величине технологического зазора $s = 16$ мм снижает производительность по подрешетному продукту на 3–10 %, а при $s = 3$ мм повышается на 2–4 %, при этом максимум производительности Q_{Γ} смещается в сторону увеличения тангенциальной скорости V_1 .

На рисунке 3.4 изображены зависимости объемной производительности Q_o от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 .

Величины объемной производительности по результатам лабораторных испытаний получились несколько ниже (около 15 % при скоростях V_1 более $1,8d \text{ c}^{-1}$), чем теоретической (рисунок 2.14). Это объясняется тем, что теоретический расчет проводился без учета уменьшения объема классификации измельчаемого материала в зоне деформации за счет ухудшения отвода готового продукта через перфорации в барабане.

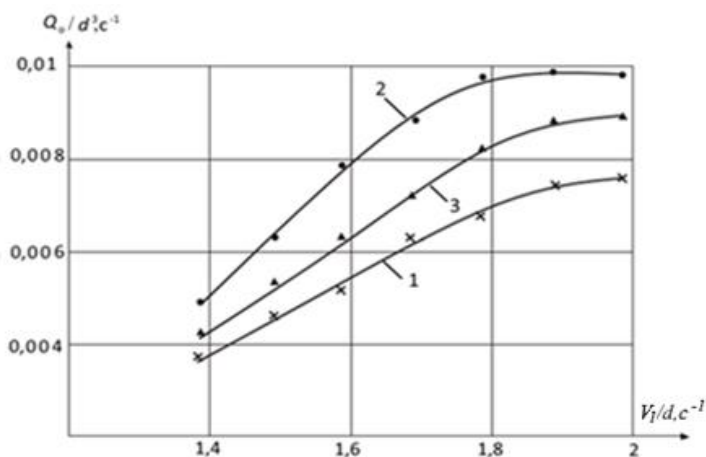


Рисунок 3.4 – Зависимость относительной объемной производительности Q_o/d^3 от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 ($\omega_2 = 0,07 \text{ c}^{-1}$, при $s = 16 \text{ мм}$ – кривая 1, $s = 3 \text{ мм}$ – кривая 2, $s = 10 \text{ мм}$ – кривая 3)

Анализ представленных графиков показывает, что для принятых значений ω_1 и s , определенных с помощью метода планирования экспериментов, наивысшая производительность по подрешетному продукту возрастает до 85 % при частоте вращения перфорированного барабана $\omega_2 = 0,07 \text{ c}^{-1}$, причем этот максимум приходится и на аналогичные значения ω_2 . Значит, при такой угловой скорости перфорированного барабана силами трения приводятся в движение нижние слои материала, находящиеся в дугообразном клиновом зазоре, при этом распределение поля скоростей в зазоре наиболее благоприятно для привода в попутное движение всех промежуточных слоёв материала. Уменьшение скорости ниже указанного порога, не позволяет вовлекать в движение все слои материала, а превышение приводит к началу фазы проскальзывания нижнего слоя материала относительно перфорированного барабана из-за снижения сил сцепления.

Зависимости относительной объемной производительности Q_0/d^3 от тангенциальной скорости перфорированного барабана V_2 получились практически такие же, как и от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 . Это объясняется тем, что с точки зрения процесса измельчения нет существенной разницы какие из скоростей V_1 или V_2 больше, так как суммарная скорость потока материала определяется как среднее значение этих скоростей, а давление, как на вал-измельчитель, так и на перфорированный барабан действует одинаковое.

Влияние величины технологического зазора s между рабочими поверхностями вала-измельчителя и перфорированного барабана на производительность Q_T по подрешетному продукту можно оценить по графикам на рисунке 3.3. Как видно, высокая степень выхода готового продукта (свыше 85 %) имеет место при зазорах, лежащих в интервале около 10 мм и меньше. Однако интенсивность роста несколько снижается с уменьшением s , а затраты энергии на измельчение, судя по теоретическим данным, существенно увеличиваются (рисунок 2.13). С уменьшением зазора менее 10 мм интенсивность роста производительности Q_T снижается, что объясняется ухудшением условий измельчения и затруднением выхода готового продукта через перфорирующие отверстия барабана, в результате чего уже готовый продукт помола не успевает продавиться сквозь отверстия барабана и накапливается за зоной измельчения. С увеличением зазора свыше 10 мм величина контактных напряжений на рабочих поверхностях вала-измельчителя и барабана снижается, что предположительно приводит к неполному разрушению кусков измельчаемого материала, а значит и к уменьшению производительности Q_T .

В процессе эмпирического исследования также было установлено, что часть перфораций барабана, расположенных ближе к загрузочному лотку (около 20 % от длины вала-измельчителя) забиваются крупными частицами, ухудшая процесс классификации и несколько уменьшая производительность агрегата. Для решения этой проблемы на промышленных агрегатах вал-измельчитель можно сделать в виде отдельных цилиндров, установленных соосно на одном валу с некоторым интервалом. Непосредственно под цилиндром, перфорированным барабаном,

можно сделать без перфораций, что повысит его прочность, а перфорации сделать в интервалах между цилиндрами. Это несколько снизит производительность классификации, но повысит прочность конструкции и надежность агрегата в целом.

3.5 Влияние фракционного состава и высоты столба поступающей на измельчение исходной породы на свойства готового продукта

Эмпирическое исследование, проведенное на лабораторной установке, выявило связь между режимами работы и производительностью агрегата. Имеются аналогичные данные с предприятий рудоподготовки при переработке слабых горных пород, например, гипса, где производительность большинства технологической линии на последнем этапе измельчения может существенно изменяться от режимов работы. Это может быть обусловлено изменением параметров поступающего на измельчение сырья, что влияет на производительность параллельно работающего оборудования. Для предотвращения простоев, связанных с несинхронностью работы такого оборудования необходимо проводить исследования, позволяющие выявлять связь режимов переработки с требуемой производительностью процесса при надлежащем качестве. Например, таких как исходные свойства измельчаемого продукта: высота столба исходного материала, фракционный состав перерабатываемого материала и др.

Как было указано выше, при проведении предыдущих исследований высота столба/поступающего на измельчение материала, выбиралась по условию заполнения объема перфорированного барабана на уровне верхней точки вала-измельчителя. При изменении величины технологического зазора s расход исходного материала, поступающего в перфорированный барабан, изменялся в пределах от 22 до 114 см³ в минуту. Указанный цикл исследований проводился при постоянном зазоре $s = 10$ мм при варьировании заполнения объема

перфорированного барабана от уровня верхней точки вала-измельчителя до уровня, соответствующего углу захвата, материала, поступающего в щель между рабочими поверхностями барабана с перфорацией и вала-измельчителя. Этот диапазон находится в пределах изменения h от 46 до 26 мм. Приняв за середину диапазона изменения высоту столба поступающего на измельчение материала $h = 35$ мм, а интервал варьирования – 5 мм, интервал значений высоты исходного столба h из учета расположения звездных точек равен 14 мм.

Состав подаваемой порода по фракциям может меняться в широких пределах из-за характеристик сырья и его влажности, ширины выходной щели дробилок, количества примесей и т.п. В ходе опытов анализировалось воздействие содержания класса 0,3мм в породе на качество измельчения. По результатам анализа состава исходных проб за центр варьирования величины α была принята величина содержания 10,4 %. Данное значение было получено на основе данных со склада, подготовленной к реализации продукции, после завершающей стадии переработки гипса. Интервал варьирования был принят для рассматриваемого параметра 5 %, а интервал изменения содержания класса 0,3 мм в исходном продукте с учетом выявленных звездных точек составлял от 2,0 % до 19,0 %.

Порядок исследования остался прежним. Изменение исследуемых факторов проводилось следующим образом: изменялась высота столба h попадающего на измельчение продукта за счет регулировки положения заслонки 8 (рисунок 3.1), содержание класса 0,3 мм в подготовленном к измельчению материале регулировалось с помощью предварительно приготовленного состава исходного продукта. Остальные параметры измельчителя-классификатора поддерживались на уровне, обеспечивающем наивысший выход готового продукта класса 0,3 мм (раздел 3.3).

В таблице 3.5 показаны параметры ЦКРУП ВП для изучаемых параметров h и α . По выражениям (3.5), (3.8), (3.13) рассчитаны статистические характеристики исследования, проведено сравнение коэффициентов регрессии для соответствующих интервалов, при этом значения b'_{11} , b''_{12} и b''_{11} как несущественные не рассматривались.

Таблица 3.5 – Параметры ЦКРУП ВП для изучаемых параметров h и α

Изучаемые факторы	h – высота столба, поступающего на измельчение материал, мм (X_1)	α – количество частиц размером 0,3 мм в исходном продукте, % (X_2)
Значение основного уровня (0)	35	10,4
Величина интервала варьирования (J)	5	5,0
Значение верхнего уровня (+1)	40	15,4
Значение нижнего уровня (-1)	30	5,4
Значение звездной точки $+\alpha_3$ (+1,4)	42	17,4
Значение звездной точки $-\alpha_3$ (-1,4)	29	3,4

Математическая модель, полученная в процессе анализа опытных данных, имеет вид:

$$y = 5,92 + 2,79 x_1 - 3,17 x_2 - 0,53 x_1 x_2 + 0,37 x_1^2 + 1,31 x_2^2, \quad (3.21)$$

После преобразований на основе выражения (3.15) получим уравнение:

$$Q_T = 9,339 - 0,345h - 0,962\alpha - 0,0212h\alpha + 0,0148h^2 + 0,0524\alpha^2 \quad (3.22)$$

Результаты анализа уравнения регрессии (3.22) и соответствующих экспериментов (таблицы А.4 и А.5 приложения А) показывают, что присутствует хорошая сходимость опытных данных с расчетными значениями тонины готового продукта.

Критерий Фишера 3,15, а значение, определенное по таблицам, равно 6,39 при доверительном уровне 95 %. Следовательно, принятая математическая модель (3.22) адекватно отражает изменение тонкости помола готового продукта в зависимости от h высоты столба и α содержания частиц класса 0,3 мм в исходном сырье.

Зависимость изменения тонины подрешетного продукта от h высоты столба и α содержания частиц класса 0,3 мм при стабилизации на основном уровне одного из этих показателей показаны на графиках (рисунки 3.5 и 3.6).

Анализ результатов исследования (рисунок 3.6) показывает, что с увеличением α от 5 % до 15 % содержание частиц класса 0,3 мм в продукте помола (R_{315}) увеличивается несущественно.

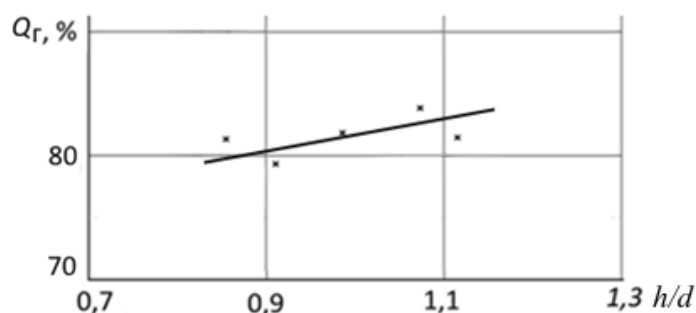


Рисунок 3.5 – Зависимость изменения Q_g продукта (R_{315}) от высоты столба h , поступающего на измельчение материала (при $\alpha = 5,5 \%$)

Зависимость изменения производительности Q_g от содержания класса 0,3 мм в исходном материале α представлены на рисунке 3.6 при значении основного уровня планирования высоты столба $h = 36$ мм.

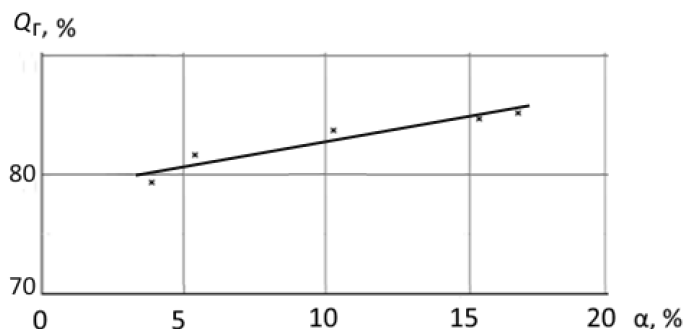


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения Q_g готового продукта (R_{315}) от содержания класса 0,3 мм в исходном материале α

Анализ зависимостей тонины от высоты столба h поступающего на измельчение материала показывает, что с ростом h в интервале от 29 до 43 мм для исследованных значений параметров несколько увеличивается содержание тонины класса 0,3 мм (R_{315}), а содержание более мелких фракций снижается. Это снижение может быть связано с тем, что с увеличением высоты слоя поступающего материала в клинообразный зазор между рабочими поверхностями барабана с перфорацией и вала-измельчителя частицы перераспределяются. Происходит заполнение пространства мелкими частицами вокруг крупных, частицы класс 0,3 мм выдавливаются через отверстия в перфорированном барабане, в результате чего переизмельчение не происходит.

Было установлено, что при измельчении в измельчителе-классификаторе частицы, имеющие размеры меньше размера отверстия в перфорированном

барабане, выдавливаются из зоны измельчения и переизмельчения не происходит.

Таким образом, качество измельчения в измельчителе-классификаторе существенно не зависит от высоты столба h и содержания частиц класса 0,3 мм в исходном материале.

3.6 Повышение эффективности процесса измельчения в измельчителе-классификаторе

Эффективность процесса измельчения \mathcal{E} в измельчителе-классификаторе можно оценить на основе затрат энергии на процесс измельчения. При этом оценивать эффективность нужно с учётом, как количества произведенного готового продукта, так и с учётом его качества. Для этого можно принять за основной показатель эффективности измельчения отношение необходимой для измельчения мощности W к производительности Q_{Π} процесса измельчения материала до соответствующего класса. Однако затраты энергии на измельчение зависят и от размера рабочих органов измельчителя. Поэтому эффективность установки лучше учитывать по удельной мощности ΔW , приходящейся на единицу площади контактной поверхности агрегата. Если за единицу длины выбрать диаметр вала-измельчителя d , то $\Delta W = W/d^2$, тогда:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta W}{Q_{\Pi}}, \quad (3.23)$$

где $Q_{\Pi} = Q_o \cdot Q_r / 100$.

При проведении экспериментов на лабораторной установке для определения затрачиваемой электрической мощности на измельчение использовался лабораторный ваттметр PCE-360.

В процессе измерения потребляемой мощности необходимо учитывать потери на передаточные механизмы и подшипники, по результатам расчетов общий КПД установки составил около 0,6. Более точное значение определять не нужно, так как исследования будут проводиться методом сравнения.

Исследования мощности, необходимой на измельчение, проводились из условий максимальной производительности, полученной по результатам предыдущих исследований ($\omega_1 = 0,53 \text{ с}^{-1}; \omega_2 = 0,07 \text{ с}^{-1}; s = 10 \text{ мм}$). В процессе теоретических исследований было установлено, что минимальное давление q на рабочие поверхности, а, следовательно, и затраты энергии на измельчение, имеют место при соотношении тангенциальных скоростей барабана с перфорацией и вала-измельчителя в пределах $2/1 - 3/1$, именно около этих значений нужно проводить лабораторные испытания.

Порядок проведения опытов оставался прежним. Изменение изучаемых факторов: тангенциальная скорость вала-измельчителя X_1 , в диаметрах вала за секунду; тангенциальная скорость барабана X_2 , в диаметрах вала-измельчителя за секунду. Испытания осуществлялись аналогично предыдущим исследованиям, за счёт ступенчатого цепного привода. Остальные параметры измельчителя-классификатора поддерживались на уровне, обеспечивающем наивысший выход готового продукта класса 0,3 мм (раздел 3.3). В таблице 3.6 представлены интервалы варьирования, а в таблице А.6 (приложение А) приведены результаты, полученные на основе ЦКРУП ВП для изучаемых параметров V_1 и V_2 .

Таблица 3.6 – Интервалы варьирования ЦКРУП ВП для параметров V_1 и V_2

Изучаемые факторы	Тангенциальная скорость вала-измельчителя V_1, dc^{-1} (X_1)	Тангенциальная скорость перфорированного барабана V_2, dc^{-1} (X_2)
Значение основного уровня (0)	1,81	1,5
Величина интервала варьирования (J)	0,47	0,47
Значение верхнего уровня (+1)	2,28	1,97
Значение нижнего уровня (-1)	1,34	1,03
Значение звездной точки $+\alpha_3$ (+1,4)	2,28	1,97
Значение звездной точки $-\alpha_3$ (-1,4)	1,34	1,03

В качестве функции отклика использовалось значение эффективности измельчения \mathcal{E} при соответствующих параметрах эксперимента. По выражениям (3.8), (3.13) и (3.5) определялись дисперсии, коэффициенты регрессии, а также

доверительные интервалы для соответствующих коэффициентов регрессии.

Сопоставлены значения коэффициентов регрессии с доверительной вероятностью 95 % и рассчитана их статистическая значимость, кроме коэффициентов v'_{11} , v''_{12} и v''_{11} .

Получена математическая модель по результатам анализа данных экспериментов в виде:

$$y = -5,9 + 1,65 x_1 + 1,7 x_2 - 0,043 x_1 x_2 + 2,3 x_1^2 + 0,52 x_2^2. \quad (3.23)$$

На основе выражения (3.15) получаем зависимость с начальными параметрами:

$$\mathcal{E} = 20,465 - 32,673V_1 - 3,378V_2 - 0,193V_1V_2 + 10V_1^2 + 2,476V_2^2. \quad (3.24)$$

Анализ выражения (3.24) и экспериментальных данных (таблица А.7 приложения А) выявил хорошую сходимость экспериментальных исследований и расчетных параметров тонкости подрешетного продукта.

Показатель критерия Фишера равен 3,25, а табличное значение составляет 6,39 при доверительном уровне 95 %. Значит, представленная модель (3.24) правильно отражает зависимости эффективности измельчения \mathcal{E} от факторов V_1 и V_2 .

На рисунке 3.7 показаны зависимости эффективности от отношения V_1 к V_2 для различных значений технологического зазора s .

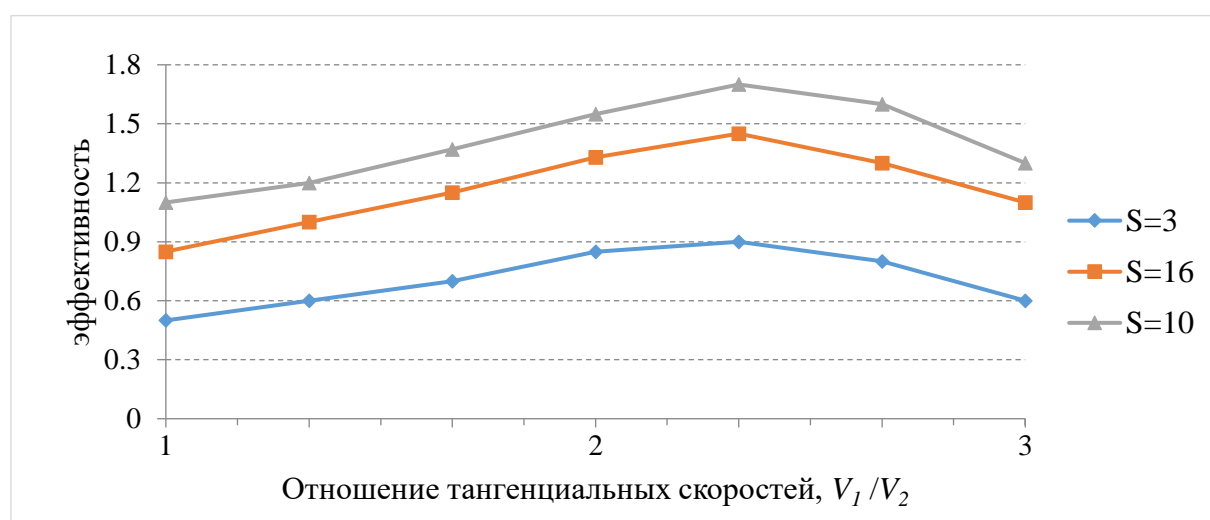


Рисунок 3.7 – Зависимости эффективности от отношения V_1 к V_2 для различных значений технологического зазора s

На основе результатов исследования изменения величин тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 и тангенциальной скорости перфорированного барабана V_2 было установлено, что при соотношении этих параметров около 3-х эффективность измельчения установки повышается более чем на 30 %.

Выводы по главе 3

1. Установлена зависимость производительности установки Q_r от частоты вращения вала-измельчителя ω_2 , частоты вращения перфорированного барабана ω_1 , величины технологического зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем s . При значениях $\omega_1 = 0,53 \text{ с}^{-1}$; $\omega_2 = 0,07 \text{ с}^{-1}$; $s = 10 \text{ мм}$ производительность по готовому продукту с содержанием частиц класса 0,3 мм составляет более 85 %.

2. Установлено, что качество помола в измельчителе-классификаторе существенно не зависит от высоты столба и содержания частиц класса 0,3 мм в исходном материале. При увеличении столба исходного материала до величины диаметра d вала-измельчителя и увеличении содержания частиц класса 0,3 мм до 20 % в исходном материале повышение содержания в измельченном материале частиц класса 0,3 мм составляет до 5 %.

3. С помощью исследования изменения величин тангенциальных скоростей вала-измельчителя V_1 и перфорированного барабана V_2 было установлено, что при соотношении этих параметров около 3-х эффективность измельчения установки повышается более чем на 30 %.

4 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ

4.1 Технологическая схема производства сушеных бокситов

Экономическая эффективность модернизированных или новых машин определяется сравнением новой с предыдущей в эксплуатации. Экспериментальные исследования процесса измельчения гипса с одновременной классификацией с целью получения минерального порошка заданного фракционного состава, проведенные на лабораторной установке, показали, что примененная методика определения параметров перерабатываемого оборудования, при соответствующей модернизации, может быть применена для модернизации действующих линий производства сушеных бокситов и порошка глины огнеупорной молотой ТОО «Завод Казогнеупор» (г. Рудный, Республика Казахстан). Использование рекомендаций данной работы и методики расчета основных параметров измельчителя-классификатора поможет выявить, по сравнению с традиционной схемой (с применением стандартного оборудования), ряд преимуществ.

Боксит поставляется с Восточно-Аятского месторождения Краснооктябрьского рудоуправления АО «Алюминий Казахстана». Бокситы имеют различную окраску, зависящую от количества и формы нахождения в них железа. Характерной особенностью почти всех разновидностей является бобовая структура. Среди бокситов встречаются каменистые, рыхлые и глинистые разновидности.

Каменистые бокситы представляют собой крепкую породу ясно выраженного бобового строения, кирпично-красной, желтовато-красной, розовато-серой, серой окраски. Бобовины, как правило, однородны, магнитны, темно-бурого, черного цвета. Характер цемента – базальный и соприкосновения. В таблице 4.1 представлен химический состав бокситов.

Бокситы рыхлые представляют собой желтовато-бурую слабощементированную, обычно сыпучую породу, имеющую мелко-, среднебобовую структуру со скрытокристаллической, пелитовой и кристаллически-зернистой структурой цементирующей массы. Боковины обычно бурые, рыхлые, частично выщелочены, пустоты и мелкие трещины заполнены мелкокристаллическим гидраргиллитом и сидеритом. Среди рыхлого боксита встречаются обломки каменистого, иногда прослой бокситовых глин. Потери при прокаливании (п.п.п.) обусловлены присутствием в порах гидраргиллита.

Таблица 4.1 – Химический состав бокситов

Показатель	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	SiO ₂ , %	TiO ₂ , %	CaO, %	C _{орг} , %	п.п.п., %
Пределы	39–47	15–24	6,3–20	1,7–4,2	0,10–0,47	0,15–0,74	19,5–24,2
Среднее	45	18	12	2,3	0,22	0,27	22

Данные параметры боксита соответствуют маркам Б2-Б6 по ГОСТ 974–74. В таблице 4.2 представлен гранулометрический состав рассматриваемого вида боксита.

Таблица 4.2 – Грансостав рыхлого боксита при естественной влажности

> 2 мм	2–0,5 мм	0,05–0,002 мм	< 0,002 мм
4,17	30,82	23,21	41,80

Каменистый боксит представлен крупными валунами размером около 300 мм, в таблице 4.3 представлены физико-механические свойства бокситов.

Существующая технология производства сушеного боксита включает в себя транспортировку сырья с площадки складирования в бункер цеха переработки шлака (ЦПШ), далее – по ленточному конвейеру материал поступает в роторную дробилку СМД-75. Дроблённый материал классифицируется на грохоте ГИС-31 с установленной сеткой 20 мм, после которого надрешетный продукт в количестве до 10 % возвращается на до дробление.

Таблица 4.3 – Физикомеханические свойства бокситов

	Влажность Естественная, %	Удельный вес г/см ³	Пористость естественная	Предел текучести	Нижний предел пластичности	Число пластичности	Угол внутреннего трения	Сцепление, кг/см ³	Величина набухания	Предел прочности на сжатие, кг/см ²	Предел прочности на растяжение, кг/см ²
Боксит каменистый	7,35	2,85	19,72	–	–	–	–	–	–	441	43
Боксит рыхлый	32,3	2,62	1,44	37,5	28,5	10	31,8	0,825	1,7	–	–

Материал, прошедший крупное дробление и классификацию, поступает на валковую дробилку ДГ 400×250, сведённую до 10 мм, после чего складывается в отсек цеха ЦПШ для последующей сушки. Через бункер материал поступает в сушильный барабан размером диаметром 1,2 метра длиной 10 метров с установленной горелкой мощностью 1,5 МВт. Для создания необходимого разрежения в барабане и обеспечения аспирации используется дымосос мощностью 30 кВт.

Система аспирации включает в себя осадительную камеру и каскад циклонов, пылеунос на стадии сушки составляет около 25 %.

В ходе производственного процесса исходный продукт приобретает следующий химический (таблица 4.4) и гранулометрический состав (таблица 4.5).

Объёмная насыпная масса.

Сушеный боксит (товар) – 1,190 г/см³.

Уловленная пыль – 0,660 г/см³.

Таблица 4.4 – Химический состав

Показатель	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	SiO ₂ , %	TiO ₂ , %	п.п.п., %
Сушеный боксит (товар)	45,85	13,50	14,44	1,18	23,22
Уловленная пыль	45,08	13,20	16,90	1,00	23,00

Таблица 4.5 – Гранулометрический состав

Сушеный боксит (товар)			Уловленная пыль		
Сетка №	Остаток	Проход	Сетка №	Остаток	Проход
20,0 мм	0,0	100	2,0 мм	0,0	100
10,0 мм	4,3	95,7	1,6 мм	0,0	100
8,0 мм	1,8	93,9	1,0 мм	0,0	100
7,0 мм	1,5	92,4	0,63 мм	0,1	99,9
6,0 мм	1,9	90,5	0,5 мм	0,1	99,8
5,0 мм	3,5	87,0	0,315 мм	0,1	99,7
4,0 мм	3,5	83,5	0,2 мм	6,4	93,3
3,2 мм	3,5	78,0	0,1 мм	8,0	85,3
2,0 мм	10,5	67,5	0,09 мм	61,5	23,8
1,0 мм	20,5	47,0	0,063 мм	3,8	2,0
0,5 мм	16,2	30,8			
0,315 мм	8,5	22,3			
0,1 мм	14,2	8,1			

4.2 Технологическая схема производства порошковой огнеупорной молотой

Огнеупорная глина доставляется с Бускульского месторождения предприятия ТОО «Завод Казогнеупор», в таблице 4.6 показано содержание основных компонентов в её составе.

Таблица 4.6 – Содержание основных компонентов огнеупорной глины

Компонент	Содержание в огнеупорной глине, %	Компонент	Содержание в огнеупорной глине, %
SiO ₂	49,03–56,00	CaO	0,64–0,75
Al ₂ O ₃	32,83–37,04	MgO	0,66–0,76
Fe ₂ O ₃	1,84–2,33	K ₂ O	0,67–0,74
TiO ₂	не обнаружено	Na ₂ O	0,65–0,76
Гигроскопическая влага	3,09–4,07		

Состав минеральной глины представляет собой несколько компонентов: каолинит (не более 60 %), монотермит (11–33 %) и кварц (10–30 %), серицит и полевой шпат (в незначительных количествах). Гранулометрический состав бускульской глины представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Гранулометрический состав бускульской глины

Показатель	Размер фракции, мм				
	Больше 0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	Меньше 0,001
Содержание фракции, %	0,03-0,7	5,50-17,57	6,06-16,75	24,64-33,16	40,34-61,65

Существующая технология производства сушеного боксита состоит в следующем. Сырая огнеупорная глина БР фракции 300-0 мм доставляется из карьера автосамосвалом МА3-525 и выгружается в приемный бункер цеха ЭКЦ. Далее осуществляется дробление помощью роторной дробилки СМД-85А с мощностью электропривода 45 кВт и номинальной производительностью 100 тонн в час до размера 40 мм.

Дроблёный материал из накопительного бункера роторной дробилки поступает с помощью ленточного питателя ПЛ-500 с электроприводом мощностью 12 кВт и производительностью 100 тонн в час, в сушильный барабан СБ-1,2-6 с мощностью электропривода 22 кВт.

Высушенный продукт после сушильного барабана по конвейеру протяжённостью 12 м с мощностью электропривода 11 кВт поступает на грохот ГИС-32 с мощностью электропривода 5,3 кВт. Дека грохота имеет сито с ячейками размером 3,15 мм.

Надрешётный продукт с размером частиц более 2,25 мм направляется в накопительный бункер для последующего додрабливания на валковой дробилке ДГ 1000×550 с мощностью электропривода 40 кВт, а подрешетный – направляется на контрольное грохочение на грохот ГИС-32 с мощностью электропривода 5,3 кВт. Верхняя дека грохота снабжена ситом с ячейками размером 3,15 мм.

Подрешётный продукт затаривается в одноразовый контейнер МКР грузоподъемностью 1,5 тонны и объёмом 1,0 м³, снабженный полиэтиленовым

вкладышем. Контейнер, загруженный готовым продуктом, прошедший паспортизацию и технический контроль, отправляется на склад готовой продукции для дальнейшей отгрузки потребителю.

4.3 Методика определения рациональных параметров измельчительного оборудования

В результате анализа существующих технологических процессов было установлено, что процесс вторичного дробления на валковых дробилках можно модернизировать, путем применения методики анализа рациональных параметров оборудования в зависимости от свойств исходного сырья, тем самым значительно снизив затраты. Модернизация подразумевает изменение конструкции валковых дробилок ДГ 400×250 и ДГ 1000×550, снабжение каждого валка индивидуальным электроприводом с возможностью частного регулирования угловой скорости.

На рисунке 4.1 представлен алгоритм получения рациональных параметров функционирования измельчителей для слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами.

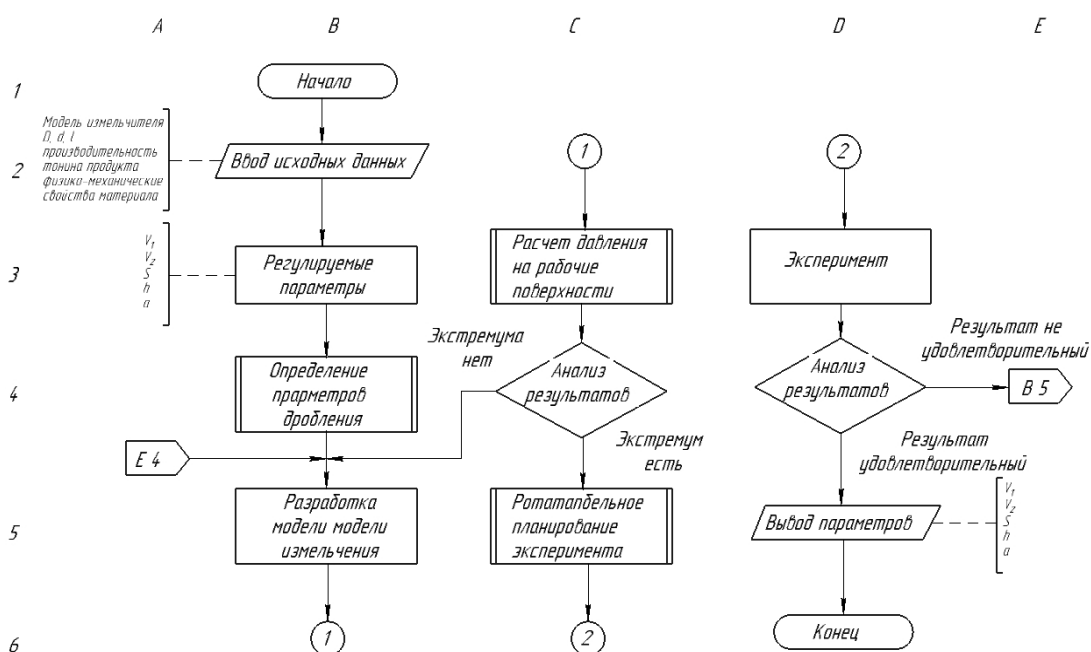


Рисунок 4.1 – Алгоритм получения рациональных параметров функционирования измельчителей для слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами

Внедрение и эксплуатация данной методики обеспечили в сравнении с типовой технологической схемой ряд преимуществ:

- уменьшение затрат электроэнергии на измельчение бокситов и огнеупорных глин;
- более эффективный помол в шаровых мельницах материала, прошедшего предварительное измельчение в модернизированных дробилках;
- снижение материальных и трудовых затрат;
- сокращение простоев оборудования в результате отказов и поломок в процессе эксплуатации;
- улучшение качества готового продукта за счет снижения в нем значительной доли пылевидных составляющих;
- улучшение экологических характеристик окружающей среды.

Фактическая экономия себестоимости с 2015 по 2017 годы от применения данной методики на производстве сушеного боксита и порошков огнеупорной молотой глины составила 12 351 252 тенге при объеме реализации сушеного боксита 54 000 тонн и порошков огнеупорной молотой глины 4 800 тонн. В том числе снижение затрат на электроэнергию составило 2 863 000 тенге. Акт внедрения представлен в приложении Г.

Если рассматривать процесс модернизации для предприятий России, то стоимость модернизации валковых дробилок, обеспечивающих переработку огнеупорной глины и бокситов, при условии их единичного изготовления, обойдется около 500 тыс. рублей.

Кроме того, на основе анализа результатов лабораторных исследований можно сделать заключение, что предлагаемый процесс переработки горной породы будет более эффективным, а величина коэффициента снижения энергоемкости составит приблизительно $K_3 = 0,91$.

Исходя из представленной информации, можно ориентировочно определить экономический эффект:

$$\mathcal{E} = (1 - K_3) q_{cp} \cdot S \cdot C_3 + C_y \cdot A \cdot K_n - \frac{\Delta}{T}, \quad (4.1)$$

где q_{cp} – величина средней энергоемкости при получении готового продукта из глины огнеупорной ($q_{cp} = 0,45$ кВт·час / m);

S – значение средней годовой производительности ($S + 2\ 400$ m);

$C_э$ – величина стоимости одного киловатт-часа электроэнергии для промышленных потребителей ($C_э = 2,3$ руб.);

C_y – затраты на измельчение одной тонны готового продукта с помощью улучшенных дробилок ($C_y = 250$ руб.);

A – годовой объем производства измельченного материала при использовании двух улучшенных дробилок ($A = 58\ 800$ m);

K_n – коэффициент, учитывающий простои оборудования из-за отказов, который показывает отношение времени простоя в отказе к времени работы за сутки ($K_n = 0,1$);

$\Delta \approx 500\ 000$ руб. – усредненные затраты на модернизацию оборудования;

$T \approx 10$ лет – средний срок эксплуатации агрегата.

Соответственно на основании имеющихся исходных данных можно рассчитать предполагаемый экономический эффект для двух модернизированных валковых дробилок, используемых в технологическом процессе производства порошка глины огнеупорной и сушеного боксита:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= (1 - 0,91) \cdot 0,45 \cdot 270\ 000 \cdot 5,3 + 520 \cdot 180\ 000 \cdot 0,1 - 1\ 500\ 000 / 10 = \\ &= 9,8 \text{ млн. руб.} \end{aligned}$$

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения измельчителя-классификатора составляет 9,8 млн. рублей.

4.4 Технологическая схема на переработку отсева металлургического в железосодержащий продукт

Отсевы металлургические (далее по тексту – «материал») складываются в непосредственной близости от загрузочного устройства, чтобы сократить время для подвоза материала и уменьшить работу техники для подачи материала.

Загрузка материала в бункер питатель осуществляется погрузочной техникой – погрузчиком или экскаватором. Материал с бункера питателя поступает в загрузочную воронку шнекового конвейера. Затем материал шнековым конвейером подается в перемешивающий бак объемом 5 м³. Бак наполняется материалом и водой. Вода поступает из отдельной ёмкости 5 м³ с помощью дренажного насоса. В баке с помощью перемешивающего устройства материал перемешивается с водой в течение 10 минут. Далее материал пульпа переливается в бак емкостью 1 м³ и перекачивается с помощью дренажного насоса на разделяющие устройства. Разделяющие устройства делят материал по крупности, более крупные частицы сливаются в специально отведенный карман, и с помощью погрузчика убираются на склад. Мелкий материал попадает в емкость 3 м³ самотёком. Из ёмкости пульпа попадает на разделяющие устройства. Разделяющие устройства по физическим принципам работы очищают воду, которая сливается в емкость 200 л. Остатки от очистки воды сливаются в специальный карман и погрузчиком отвозятся на склад. Очищенная вода из ёмкости перекачивается насосом в емкость с перемешивающим устройством (оборотная вода). И цикл повторяется вновь. Время работы одного цикла составляет 30 минут.

4.5 Модернизация технологической схемы производства

При модернизации технологических схем производства железосодержащего продукта (отсева железосодержащего магнетитового) ООО «Гермес» (сертификат соответствия представлен в приложении Д), в 2020 году на производственной площадке была внедрена методика определения рациональных параметров функционирования магнитного и классифицирующего оборудования, разработанная инженером-технологом Митусовым Павлом Евгеньевичем.

Данная методика предусматривает установление конструктивных и режимных параметров оборудования в зависимости от ряда факторов, влияющих

на процесс магнитного извлечения. На основании этой методики в составе магнитных сепараторов линии доводки мелкодисперсного материала была изменена конструкция магнитного сепаратора ССЖ-150Л и магнитного сепаратора ССЖ-100П таким образом, что вал сепаратора получил индивидуальный привод с возможностью изменения угловой скорости с помощью частотного регулятора электродвигателя.

Внедрение и эксплуатация данной методики по сравнению с типовым техпроцессом позволяет:

- снизить время рабочего цикла переработки с 30 минут до 25 минут;
- более эффективно выделять мелкодисперсный продукт с увеличением на 3 %, что уменьшило потери по продукту, снизив их до 1 %.
- снизить материальные и трудовые затраты.

Снижение себестоимости в 2020 и 2021 годах за счет использования данной методики на производстве железосодержащего продукта (отсева железосодержащего магнетитового) составила 5 460 000 рублей при объеме реализации продукта 4 000 тонн. В том числе дополнительную прибыль за счёт снижения потерь продукта 1 040 000 рублей. Акт внедрения представлен в приложении Е.

4.6 Требования к железосодержащему продукту

Рассмотрим требования к железосодержащему продукту (отсеvu железосодержащего магнетитовому), получаемому при переработке металлургических шлаков, зол уноса ТЭЦ и очистке побочных продуктов металлургического производства. Продукт предназначен для обогащения доменных и сталеплавильных производствах, для производства магнитных жидкостей, как корректирующая добавка в производстве портландцемента. Железосодержащий продукт представляет собой твердые частицы преимущественно тёмного цвета.

Химический состав железосодержащего продукта должен соответствовать представленному в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Химический состав железосодержащего продукта

Наименование	Массовая доля, %					
	Fe, общий	Влага	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
Железосодержащий продукт	≤ 92	≤ 10	≤ 8,5	≤ 5,5	≤ 7	≤ 0,75

Массовая доля общей влаги не более 10 % (по согласованию с потребителем, допускается увеличение массовой доли влаги до 15 %).

Не допускается загрязнение железосодержащего продукта металлическим ломом, боем кирпича и другими посторонними включениями. Фракционный состав железосодержащего продукта от 0,01 мм до 0,1мм.

4.7 Контроль качества продукта

Железосодержащий продукт принимают партиями. Партией считается количество железосодержащего продукта, отгруженное одному потребителю, оформленное одним документом о качестве (паспорте). Партия должна быть не менее 5 и не более 1500 тонн.

В документе о качестве (паспорте) должно быть указано:

- наименование предприятия-поставщика и его адрес;
- наименование материала;
- номер партии;
- масса партии;
- химический состав материала;
- массовая доля влаги в процентах;
- обозначение настоящего стандарта;
- номера транспортных средств (ж/д вагонов, автотранспорта);

– дата отгрузки.

Приёмка потребителем железосодержащего продукта должна производиться по фактической массе поступившего материала.

Для проверки соответствия железосодержащего продукта требованиям настоящего стандарта от партии отбирают пробы, которые подвергаются приёмо-сдаточным и периодическим испытаниям.

Приёмо-сдаточные испытания железосодержащего продукта включают определение химического состава, массовой доли влаги, наличия посторонних включений, для каждой отгруженной партии.

Отбор проб осуществляется из подготовленного к отгрузке участка материала поставщика, составляющего пробную партию (у потребителя с ж/д вагона или автотранспорта с поверхности материала).

Проба железосодержащего продукта отбирается способом высечки или щупом в пяти разных точках, соблюдая расстояние между точками отбора не более двух метров. Количество пробы железосодержащего продукта должно составлять не менее чем 0,5 кг.

Далее полученные пробы объединяют, интенсивно перемешивают механизированным или ручным приводом, а затем методом квартования формируют усреднённую пробу, масса которой должна быть не менее чем 2,5 кг. Усреднённую лабораторную пробу помещают в две чистые, сухие и герметичные банки.

Усреднённая проба из одной банки подвергается испытаниям. На другую банку наносят маркировку с указанием предприятия-поставщика, наименование материала, даты отбора пробы, номера партии и она хранится для проведения при необходимости повторных исследований (протокол исследований от 11.11.2019 г. представлен в приложении Ж).

В случае отрицательных результатов исследования даже по одному показателю необходимо провести по нему повторные исследования на основе удвоенной выборки для той же партии. Результат такого исследования является окончательным.

Выводы по главе 4

Применение разработанной методики достижения рациональных параметров измельчителя-классификатора для грубого помола слабых горных пород может быть эффективно использовано для других видов горно-обогатительного оборудования на основе дальнейших исследований закономерностей его функционирования, что позволит повысить эффективность горного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В диссертационной работе решена научная задача, имеющая значение для развития знаний в области создания и эксплуатации машин для переработки горных пород, что соответствует п. 15 Паспорта научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины», которая состоит в обосновании рациональных параметров (скоростей вращения рабочих органов и технологического зазора) измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород, позволяющих повысить эффективность процесса измельчения за счёт создания комбинированного воздействия со стороны рабочих органов агрегата в зоне разрушения с одновременным отводом готового продукта.

Результаты и выводы, полученные лично автором:

1. Разработана конструкция измельчителя-классификатора для переработки на стадии грубого помола слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, которая обеспечивает измельчение материала за счет комбинированного нагружения с одновременной классификацией готового продукта.
2. На основе энергетического метода расчёта контактных давлений разработана теоретическая модель разрушения горной массы, обладающей пластическими свойствами, позволяющая определить рациональные параметры скоростей вращения рабочих органов и технологического зазора измельчителя-классификатора с учетом физико-механических свойств горных пород.
3. Установлена зависимость давления на рабочие поверхности агрегата от разницы тангенциальных скоростей барабана с перфорацией и вала-измельчителя. Отмечено, что при их соотношении около 3-х достигается снижение давления до 2-х раз.
4. Установлена зависимость производительности по готовому продукту от скоростей рабочих органов измельчителя-классификатора. Отмечено, что эффективность измельчения повышается более чем на 30 % при соотношении тангенциальных скоростей вала-измельчителя и барабана с перфорацией в

пределах около 3-х при технологическом зазоре около 0,3 от диаметра вала-измельчителя.

5. Установлена зависимость производительности по готовому продукту от высоты столба h поступающего на измельчение материала (подачи исходного материала) и повышения содержания класса 0,3 мм в исходном материале с 5 % до 20 %, при этом количество подрешетного продукта установленного фракционного состава увеличивается незначительно (в пределах 3–5 %).

6. Разработана методика выбора рациональных конструктивных и режимных параметров измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами, которая позволяет достигать высокой производительности агрегата при относительно невысоких энергозатратах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А. В. Направленное изменение свойств горных пород физико-химическим воздействием в целях эффективной рудоподготовки / А. В. Александров, Н. М. Литвинова, Т. Н. Александрова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S2–1. – С. 3–9.
2. Алюшин, Ю. А. Применение энергетического метода для расчёта и анализа процессов пластического формоизменения металлов / Ю. А. Алюшин, С. А. Еленев // Исследования процессов пластической деформации металлов: сборник научных трудов. – 1965. – С. 106–133.
3. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых/С.Е.Андреев,В.А.Перов,В.В.Зверевич–М.:Недра,1980.–415с.
4. Анисимов, В. Н. Анализ и перспективы импульсных электромагнитных и одновременных упругих волн напряжений при рудоподготовке железистых кварцитов / В. Н. Анисимов, А. Р. Смольяков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – № 10. – С. 13–24.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов машин / И. И. Артоболевский. – М. : Наука, 1975. – 640 с.
6. Баизбаев, М. Б. Влияние техногенных факторов на эффективность комбинированной разработки рудных месторождений / М. Б. Баизбаев // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сборник докладов IX Международной научно-технической конференции. – 2020. – С. 55–63.
7. Бардовский, А. Д. Разработка классификационно-измельчительного оборудования и метода его оценки при переработке отходов нерудных карьеров: автореф. дис. ... д-ра тех. наук : 05.05.06 / Бардовский Анатолий Данилович. – М., 2000. – 38 с.

8. Барон, Л. И. Определение свойств горных пород / Л. И. Барон. – М. : Госгортехиздат, 1961. – 172 с.
9. Бартенев, И. М. Выбор вида деформации и типа деформатора обработки сухих твердых почв / И. М. Бартенев // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 162–170.
10. Басыров, И. И. Инновационный способ дробления и конструкция вертикальной валковой дробилки для дробления горной массы / И. И. Басыров, А. Д. Бардовский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 121–129.
11. Березовский, С. Н. Разработка эффективной технологии добычи и переработки нерудных строительных материалов / С. Н. Березовский // Горная механика. – 2006. – № 3. – С. 21–26.
12. Бибииков, П. Я. Агрегат для измельчения и классификации слабых горных пород / П. Я. Бибииков, А. Д. Бардовский, П. Е. Митусов, А. О. Харитонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 8. – С. 166–170.
13. Бибииков, П. Я. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород / П. Я. Бибииков, А. Д. Бардовский, П. Е. Митусов, А. В. Калакутский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 233–237.
14. Бобин, В. А. Принцип измельчения минерального сырья в разрушающих гироскопических устройствах / В. А. Бобин, А. С. Воронюк, А. Н. Ланюк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. – № 1. – С. 266–268.
15. Богатов, Б. А. Добыча и переработка горных пород. Осадочные горные породы / Б. А. Богатов, Н. И. Березовский. – Минск : БНТУ, 2005. – 133 с.
16. Бочков, В. С. Анализ одностадийного и двухстадийного дробления сланца в щековой дробилке ПЦД 10 м для изготовления бетонно-мозаичной плитки / В. С. Бочков, С. Д. Дягилев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 7. – С. 78–84.

17. Бочков, В. С. Обзор и перспективы развития конусных дробилок, разрушающих горную породу «в слое» / В. С. Бочков, Ю. А. Лагунова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. – 2018. – С. 143–147.

18. Васильев, Л. М. Метод расчета предела прочности одноосно сжимаемых образцов горных пород при их разрушении в виде пирамид / Л. М. Васильев, Д. Л. Васильев, Ю. М. Ус, А. А. Потапенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 3. – С. 223–231.

19. Васильев, Л. М. Теоретическое обоснование формирования горизонтальных нормальных напряжений в массивах горных пород / Л. М. Васильев, Д. Л. Васильев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 2. – С. 81–90.

20. Вержанский, А. П. Расчет параметров рабочего органа центробежной мельницы для тонкого помола минерального сырья / А. П. Вержанский, А. Д. Бардовский, Н. М. Кряжев, П. Я. Бибиков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Т. 16. – № 12. – С. 373–382.

21. Веригин, Ю. А. Развитие теоретических представлений об измельчении материалов механическим способом / Ю. А. Веригин, Я. Ю. Веригина // Интерстроймех. – 2018. – С. 44–49.

22. Веригина, Я. Ю. Моделирование процессов измельчения материалов в механических мельницах / Я. Ю. Веригина // Ползуновский альманах. – 2018. – № 1. – С. 48–50.

23. Воронин, И. А. Моделирование технико-экономических показателей при дезинтеграции горных пород в щековых дробилках / И. А. Воронин, А. М. Крупко, П. О. Щукин, О. Н. Галактионов и др. // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 36. – № 2 (2). – С. 116–124.

24. Гаврунов, А. Ю. Вибровращательная мельница с продольно-поперечным движением мелющих тел : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Гаврунов Алексей Юрьевич. – Белгород, 2014. – 19 с.

25. Газалеева, Г. И. Механизм разрушения горных пород в процессе дробления материала «в слое» / Г. И. Газалеева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 95–100.

26. Гальперин, А. Геомеханика открытых горных работ : Учебник для вузов / А. Гальперин. – М. : Изд-во Московского государственного университета, 2003. – 473 с.

27. Герике, П. Б. Поиск инструмента для механического разрушения прочных породных массивов / П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 2. – С. 241–265.

28. Гийо, Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие / Р. Гийо. – М. : Стройиздат, 1964. – 112 с.

29. Гоголин, В. А. Обзор методов исследования устойчивости природных и техногенных массивов горных пород / В. А. Гоголин, Ю. В. Лесин // Техника и технология горного дела. – 2018. – № 3. – С. 42–56.

30. Голик, В. И. Исследование свойств горных пород при дроблении и измельчении в механических мельницах / В. И. Голик, Х. Х. Кожиев, М. А. Голодов, В. Н. Армейсков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – № 2 (62). – С. 81–87.

31. Голиков, Н. С. Улучшение технико-эксплуатационных характеристик щековых дробилок со сложным движением щеки / Н. С. Голиков // Сборник материалов V всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая». – 2013. – С. 85–86.

32. Горлов, И. В. Анализ процесса измельчения слабых горных пород / И. В. Горлов, П. Е. Митусов, А. М. Беляев // Уголь. – 2022. – № 6. – С. 44–47.

33. Грачева, Н. Ю. Установление режимных и силовых параметров вибрационной мельницы для тонкого измельчения горных пород : автореф. дис. ...

канд. техн. наук : 05.05.06 / Грачева Наталья Юрьевна. – Владикавказ, 2015. – 24 с.

34. Девяткин, Ю. А. Исследование процессов разрушения горных пород методами математического моделирования как основа проектирования конусных дробилок и прогнозирования их технологических показателей / Ю. А. Девяткин, Л. Е. Гневанова // Горное оборудование и электромеханика. – 2007. – № 7. – С. 44–49.

35. Дмитрак, Ю. В. Анализ процессов мелкого измельчения горных пород в мельницах / Ю. В. Дмитрак // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве. – 2021. – С. 75–79.

36. Дмитрак, Ю. В. Тенденции применения оборудования для тонкого измельчения горных пород / Ю. В. Дмитрак, А. П. Вержанский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – Т. 6. – С. 184–188.

37. Дубов, В. А. Об эффективности переработки горных пород / В. А. Дубов, А. С. Князев, Н. В. Солодков, М. А. Морозов, Е. А. Никифоров // Строительные материалы. – 2010. – № 10. – С. 8–9.

38. Елисеев, В. А. Исследование процесса измельчения зерна ударом / Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Елисеев. – Воронеж, 1962. – 20 с.

39. Ельникова, С. П. Определение удельных энергозатрат при дроблении «в слое» в конусных дробилках с учётом закономерностей разрушения частиц : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.13 / Ельникова Светлана Павловна. – Екатеринбург, 2020. – 22 с.

40. Еремин, Г. М. Совершенствование методов определения прочностных свойств пород и их деформируемости при применении в проектах новых технологических процессов на карьерах и поддержания устойчивости выработок / Г. М. Еремин. – М. : Горная книга, 2016. – 33 с.

41. Жабко, А. В. Условие прочности горных пород / А. В. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2014. – № 4 (36). – С. 24–28.

42. Зарогатский, Л. П. Применение инерционной дробилки при переработке алмазного сырья / Л. П. Зарогатский // Обогащение руд. – 1993. – № 4. – С. 4–7.

43. Зедгенизов, В. Г. Некоторые закономерности разрушения горных пород при ударном взаимодействии клиновидного инструмента с негабаритом / В. Г. Зедгенизов, Х. С. Т. Аль-Саккаф // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 8. – С. 28–31.

44. Иванчик, Н. Н. Конусный ударный истирающий измельчитель материалов и применяемые механизмы / Н. Н. Иванчик, Н. В. Лебедев, В. В. Кондратьев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 44–48.

45. Казаков, С. В. К динамическому расчету вибрационной конусной дробилки на основе трехмассной системы / С. В. Казаков, Е. В. Шишкин // Обогащение руд. – 2016. – № 4. – С. 43–47.

46. Карасев, М. А. Прочность и деформируемость горных пород / М. А. Карасев // Теоретический и практический потенциал современной науки. – 2020. – С. 130–134.

47. Карев, В. И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс и дебит скважин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.02.04 / Карев Владимир Иосифович. – СПб., 2010. – 34 с.

48. Карев, В. И. О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния / В. И. Карев, Д. М. Климов, Ю. Ф. Коваленко, К. Б. Устинов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2016. – № 5. – С. 15–21.

49. Клишин, И. В. Особенности процесса разрушения горных пород механическим способом / И. В. Клишин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 5. – С. 28–30.

50. Кондрахин, В. П. Имитационное моделирование процесса резания горных пород / В. П. Кондрахин, А. И. Хиценко // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2003. – № 11. – С. 168–171.

51. Кряжев, Н. М. Определение рациональных параметров центробежной мельницы для тонкого измельчения карбонатных отходов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Кряжев Николай Михайлович. – М., 2004. – 24 с.

52. Лагунова, Ю. А. Разработка математической модели процесса разрушения горных пород «в слое» / Ю. А. Лагунова // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 11. – С. 38–43.

53. Лейбовиц А. Разрушение. Т.7. Ч.1. Неорганические материалы / А. Лейбовиц. – М.: Мир, 1967. – С. 61–128.

54. Лесовик, Р. В. О влиянии генетических особенностей сырья и технологии на морфологию продуктов дробления / Р. В. Лесовик, Е. И. Ходыкин, Д. М. Сопин, Н. В. Ряпухин // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 8. – С. 22–23.

55. Леттиев, О. А. Исследование и разработка системы автоматического управления измельчением золотоносных руд в шаровой барабанной мельнице : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Леттиев Олег Анатольевич. – М., 2012. – 26 с.

56. Литвинский, Г. Г. Выбор и обоснование параметров исполнительного органа буро-проходческих машин и агрегатов / Г. Г. Литвинский // Сборник научных трудов ДонГТИ. – 2018. – № 11 (54). – С. 5–21.

57. Ляпцев, С. А. Моделирование движения частицы в измельчителе / С. А. Ляпцев, Н. В. Ахлюстина // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2007. – № 8. – С. 107–110.

58. Малькова, Я. М. Многофакторная технология управления измельчением в мельницах при обогащении золотосодержащих руд / Я. М. Малькова, Б. Ю. Васильев // Неделя науки СПбПУ. – 2019. – С. 18–20.

59. Митусов, П. Е. Измельчитель-классификатор для переработки слабых горных пород в условиях современного производственного процесса /

П. Е. Митусов, П. Я. Бибииков, А. С. Филиппов // Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины. – 2022. – № 8. – С. 3–7.

60. Митусов, П. Е. Расчет геометрических параметров валкового измельчителя-классификатора / П. Е. Митусов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 8. – С. 379–383.

61. Набиуллин, Р. Ш. Анализ и разработка конструктивной схемы оборудования для вторичного дробления горных пород : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Набиуллин Рустем Шафкатович. – Екатеринбург, 2008. – 18 с.

62. Нескоромных, В. В. Аналитическое исследование процесса резания-скалывания горной породы долотом с резцами PDC / В. В. Нескоромных, К. И. Борисов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 191–195.

63. Нескоромных, В. В. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом / В. В. Нескоромных, М. С. Попова, А. Ю. Харитонов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.

64. Огурцов, В. А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.13 / Огурцов Валерий Альбертович. – Иваново, 2010. – 35 с.

65. Особенности процесса роста трещин при высокочастотном воздействии мелющих тел на горные породы = Peculiarities of crack growth process under high-frequency action of grinding bodies on rocks / В. А. Чантурия, Ю. В. Дмитрак, В. А. Атрушкевич, Л. С. Адамова. - (Обогащение полезных ископаемых). - Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. - 2022. - № 4 (120). - С. 4-9 : 4 рис. - Библиогр.: с. 8 (14 назв.). - ISSN 2079-3332.

66. Патент № 1731294 СССР, МПК В07В 4/02 (2006.01). Каскадный классификатор : № 4829951 : заявл. 17.04.1990 : опубл. 07.05.1992 / Барский М. Д., Пономарев В. Б., Катаев А. В., Рева Р. Г., Калугару Г. А.

67. Патент № 2029638 Российская Федерация, МПК В07В 4/08 (2006.01). Гравитационный пневматический классификатор : № 5038832/03 : заявл. 20.04.1992 : опубл. 27.02.1995 / Черных О. Л.

68. Патент № 2164173 Российская Федерация, МПК В03В 5/52 (2006.01), В02С 17/16 (2006.01). Измельчитель-классификатор : № 99116638/03 : заявл. 29.07.1999 : опубл. 20.03.2001 / Иванов А. М., Потапов С. А., Панченко А. И., Болотин В. В. ; заявитель Закрытое акционерное общество "Кварц".

69. Патент № 2200626 Российская Федерация, МПК В02С 19/16 (2006.01). Кольцевой вибрационный измельчитель с классификатором : № 2001113296/03 : заявл. 14.05.2001 : опубл. 20.03.2003 / Изаксон В. Ю., Власов В. Н., Крамсков Н. П., Клишин В. И., Злобин М. Н., Матвеев А. И. ; заявитель Институт горного дела Севера СО РАН.

70. Патент № 2228225 Российская Федерация, МПК В07В 1/06 (2006.01). Регулируемый гравитационный сепаратор : № 2002111947/03 : заявл. 06.05.2002 : опубл. 10.05.2004 / Баранов Ю. Н., Мерчалов С. В. ; заявитель Воронежский государственный аграрный университет им. К. Д. Глинки.

71. Патент № 2245862 Российская Федерация, МПК С04В 35/03 (2006.01), С04В 9/06 (2006.01). Способ утилизации шламовых отходов талькомагнезита : № 2003117281/03 : заявл. 09.06.2003 : опубл. 10.02.2005 / Ермохина О. А., Купцов В. Н., Патрушев В. Г.

72. Патент № 2313490 Российская Федерация, МПК С01F 7/06 (2006.01), С01F 7/47 (2006.01). Способ переработки бокситов : № 2006116209/15 : заявл. 11.05.2006 : опубл. 27.12.2007 / Липин В. А., Сизяков В. М., Аминов С. Н., Липухин Е. А., Гордин О. Г., Клатт А. А., Николаева Е. А. ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет)».

73. Патент № 2353528 Российская Федерация, МПК В02С 4/10 (2006.01). Способ слоистого измельчения горных пород : № 2007107549/03 : заявл. 28.02.2007 : опубл. 27.04.2009 / Малыгин Ю. Н. ; заявитель Общество с

ограниченной ответственностью «Торговый дом "Обуховская промышленная компания"».

74. Патент № 2416464 Российская Федерация, МПК В02С 15/00 (2006.01). Гироскопический измельчитель сухой и горной породы с гибким валом : № 2009131328/03 : заявл. 18.08.2009 : опубл. 20.04.2011 / Бобин В. А., Покаместов А. В., Бобина А. В.

75. Патент № 2427425 Российская Федерация, МПК В02С 2/00 (2006.01). Гироскопический измельчитель сухой породы по фракциям : № 2009131329/21 : заявл. 18.08.2009 : опубл. 27.08.2011 / Бобин В. А., Покаместов А. В., Бобина А. В.

76. Патент № 2451564 Российская Федерация, МПК В07В 4/00 (2006.01). Пневматический классификатор : № 2010128012/03 : заявл. 06.07.2010 : опубл. 27.05.2012 / Кильдяшев С. П., Нефедов В. А. ; заявитель Открытое акционерное общество «Катализатор».

77. Патент № 2464097 Российская Федерация, МПК В02С 1/10 (2006.01), В02С 4/02 (2006.01). Способ дробления-измельчения полиминеральных рудных материалов, содержащих драгоценные камни, и дробильно-измельчительная машина для его осуществления (варианты) : № 2011106437/13 : заявл. 21.02.2011 : опубл. 20.10.2013 / Лалиев А. С., Табакаев Н. М., Тихонов Н. О.

78. Патент № 2487758 Российская Федерация, МПК В02С 2/00 (2006.01). Гироскопический измельчитель с загрузкой породы через полый вал вращения рабочей площадки : № 2012104389/13 : заявл. 09.02.2012 : опубл. 20.07.2013 / Общество с ограниченной ответственностью «НПП Профиль-Т».

79. Патент № 2498858 Российская Федерация, МПК В02С 23/12 (2006.01). Центробежная мельница : № 2012131876/13 : заявл. 24.07.2012 : опубл. 20.11.2013 / Бородавко В. И., Воробьев В. В., Иванов Е. Н., Козин А. Ю., Красильников В. А., Лускин Г. М., Таболич А. В., Усов В. Г., Шиманович П. П. ; заявитель Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «НПО "Центр"», Закрытое акционерное общество «Урал-Омега».

80. Патент № 2503508 Российская Федерация, МПК В07В 4/02 (2006.01). Воздушный классификатор : № 2012131875/03 : заявл. 24.07.2012 : опубл.

10.01.2014 / Бородавко В. И., Воробьев В. В., Иванов Е. Н., Красильников В. А., Лускин Г. М., Таболич А. В., Шиманович П. П. ; заявитель Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «НПО "Центр"».

81. Патент № 2531438 Российская Федерация, МПК В07В 1/00 (2006.01), В02С 15/00 (2006.01), В02С 17/02 (2006.01). Измельчитель-классификатор : № 2012154291/13 : заявл. 17.12.2012 : опубл. 20.10.2014 / Бибиков П. Я., Бардовский А. Д., Митусов П. Е., Воронин Б. В., Кряжев Н. М. ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"».

82. Патент № 2554976 Российская Федерация, МПК В02С 13/14 (2006.01), В02С 23/12 (2006.01). Мельница для ударно-центробежного измельчения материала : № 2013143933/13 : заявл. 30.09.2013 : опубл. 10.07.2015 / Бородавко В. И., Воробьев В. В., Гуринович В. В., Иванов Е. Н., Козин А. Ю., Красильников В. А., Таболич А. В., Шиманович П. П. ; заявитель Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «НПО "Центр"», Закрытое акционерное общество «Урал-Омега».

83. Патент № 2579795 Российская Федерация, МПК В02С 19/06 (2006.01), В02С 23/32 (2006.01). Способ измельчения белой сажи в центробежной мельнице : № 2015106408/13 : заявл. 25.02.2015 : опубл. 10.04.2016 / Хорин Д. Е., Разинков А. Ф., Кореляков А. В. ; заявитель Открытое акционерное общество «Тюменский аккумуляторный завод».

84. Патент № 2707223 Российская Федерация, МПК С01F 7/06 (2006.01), С01F 7/14 (2006.01), С22В 3/12 (2006.01). Способ переработки бокситов : 2019114678 : заявл. 15.05.2019 : опубл. 25.11.2019 / Бибинаева С. А., Сабирзянов Н. А. ; заявитель ФГБУ науки Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук.

85. Патент № 2724219 Российская Федерация, МПК В02С 1/02 (2006.01), В26D 5/42 (2006.01), В26D 7/02 (2006.01). Дробильный комплекс для измельчения кусковых материалов и способ дробления кускового материала с использованием

дробильного комплекса : № 2019133582 : заявл. 22.10.2019 : опубл. 22.06.2020 / Ковтушенко В. А., Злобин А. А. ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Инновационные металлургические технологии».

86. Патент № 2752910 Российская Федерация, МПК В02С 1/10 (2006.01). Дробильная машина с криволинейными щеками : 2020136460 : заявл. 03.11.2020 : опубл. 11.08.2021 / Дворников Л. Т., Макаров А. В., Чернов П. Е. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

87. Патент № 2758280 Российская Федерация, МПК В07В 4/02 (2006.01). Воздушный классификатор сыпучих материалов : № 2020139665 : заявл. 03.12.2020 : опубл. 28.10.2021 / Пономарев В. Б., Катаев А. В., Постовой И. В. ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

88. Патцельт, Н. Измельчение высоким давлением – задачи в новом тысячелетии / Н. Патцельт, Г. Кнехт, Э. Бурхардт, Р. Климовски // Доклады 7-й конф. операторов мельниц, Калгари. – 2000. – С. 21–23.

89. Пономарев, В. Б. Пневматическая сепарация никелевых шлаков для получения абразивов / В. Б. Пономарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10–2 (17). – С. 69–70.

90. Протасов, Ю. И. Разрушение горных пород / Ю. И. Протасов. – М. : Изд-во МГГУ, 2002. – 453 с.

91. Пыталев, И. А. Ретроспективный анализ методик определения оптимальных параметров измельчения материалов в шаровых мельницах / И. А. Пыталев, Т. М. Попова, А. А. Прохоров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 10–2 (29). – С. 57–58.

92. Ракишев, Б. Р. Удельные энергозатраты при различных уровнях дробления горных пород / Б. Р. Ракишев, М. С. Кушпанов // Записки Горного института. – 2001. – Т. 148. – № 1. – С. 150–153.

93. Редькин, Г. М. Математическое моделирование выхода пластинчатых зёрен при разных способах дробления анизотропных горных пород / Г. М. Редькин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2005. – № 5. – С. 110–117.

94. Романович, А. А. Расчет усилия, необходимого для создания направленного движения сланцевых материалов в пресс-валковом агрегате / А. А. Романович, М. А. Романович, Е. И. Чеховской // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 8. – С. 131–137.

95. Рудаев, Я. И. Моделирование деформационного поведения горных пород / Я. И. Рудаев, Д. А. Китаева, М. А. Мамадалиева // Записки Горного института. – 2016. – Т. 222. – С. 816–822.

96. Румпф, Г. Об основных физических проблемах при измельчении / Г. Румпф: пер. Л. Д. Ласточкина. – М. : Стройиздат, 1966. – 114 с.

97. Руппенейт, К. В. Вероятностные методы оценки прочности и деформируемости горных пород / К. В. Руппенейт. – М. : Стройиздат, 1964. – 253 с.

98. Севостьянов, М. В. Теория и практика механоактивации материалов при объемно-сдвиговом деформировании частиц / М. В. Севостьянов, В. А. Полуэктова, В. С. Севостьянов, А. В. Шаталов, В. В. Сирота // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2018. – Т. 24. – № 4. – С. 652–662.

99. Селиванов, Ю. Т. Математическое описание процессов классификации сыпучих материалов в барабанных грохотах / Ю. Т. Селиванов, П. В. Монастырев // Вестник ТГТУ. – 2016. – Т. 22. – № 4. – С. 588–595.

100. Серебряник, И. А. Моделирование процесса струйного помола с учетом особенностей механики деформации слюды / И. А. Серебряник // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 6. – С. 39–44.

101. Сиваченко, Л. А. Новые технологические задачи в области процессов измельчения и пути их решения / Л. А. Сиваченко, В. С. Богданов, Ю. М. Фадин // Научно-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – С. 172–178.

102. Синев, С. В. Механизмы, методы и способы разрушения горных пород в глубоком бурении / С. В. Синев // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2010. – № 1. – С. 2–7.

103. Спиринов, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спиринов, В. В. Лавров. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257с.

104. Ставрогин, А. Н. Исследование предельных состояний и деформации горных пород / А. Н. Ставрогин // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1969. – № 12. – С. 54–69.

105. Ставрогин, А. Н. Прочность горных пород и устойчивость горных выработок на больших глубинах / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. – М. : Недра, 1985. – 271 с.

106. Томлёнов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томлёнов. – М. : Металлургия, 1972. – 408 с.

107. Третьяк, А. Я. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А. Я. Третьяк, В. В. Попов, А. Н. Гроссу, К. А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 217–222.

108. Федосеев, А. П. Выбор рациональных параметров ударного инструмента для дробления негабаритов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Федосеев Алексей Петрович. – Екатеринбург, 2015. – 19 с.

109. Федотов, П. К. Методика определения осевой силы давления при разрушении материала в роллер-прессе / П. К. Федотов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 2. – С. 225–231.

110. Федотов, П. К. Моделирование процесса разрушения руды в слое частиц под давлением / П. К. Федотов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 4. – С. 71–77.

111. Федотов, П. К. Численное моделирование процесса дробления породы в слое между прокатными валками под давлением / П. К. Федотов, А. А. Пыхалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3 (35). – С. 21–26.

112. Фролов, С. Г. Формирование разрушающих нагрузок в измельчительных машинах центробежного типа / С. Г. Фролов, Г. А. Усов, Л. А. Антропов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11 (1). – С. 179–189.

113. Хажыылай, Ч. В. Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна и программы RocData / Ч. В. Хажыылай, В. А. Еременко, М. А. Косырева, А. М. Янбеков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 12. – С. 92–101.

114. Халкечев, К. В. Математическое моделирование ударно-резонансного разрушения дробимой микронеоднородной минеральной частицы пластинчатой формы / К. В. Халкечев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 1. – С. 195–201.

115. Халкечев, Р. К. Управление технологией разрушения материалов на основе математического моделирования устойчивого и неустойчивого развития трещин / Р. К. Халкечев, А. С. Каширский, К. В. Халкечев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 11. – С. 359–366.

116. Харитонов, А. О. Пресс-классификация, как метод разделения слабых горных пород / А. О. Харитонов, П. Я. Бибииков, П. М. Вержанский, Б. В. Воронин // Современное научное знание: теория, методология, практика. – 2016. – Т. 3. – С. 72–73.

117. Хопунов, Э. А. Роль факторов нагружения в формировании селективного разрушения руд / Э. А. Хапунов // Руда и металлы. Обогащение руд. – 2011. – № 2. – С. 27–33.

118. Хопунов, Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья / Э. А. Хопунов. – Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2013. – 429 с.

119. Цигельный, П. М. Дробильно-сортировочные машины и установки / П. М. Цигельный, Л. Б. Левенсон. – М. : Гостоптехиздат, 1952. – 428 с.

120. Цытович, Н. А. Механика грунтов: краткий курс / Н. А. Цытович. – М. : Комкнига, 2008. – 289 с.

121. Чебан, А. Ю. Технологические схемы дробления при переработке строительных горных пород / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина // Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья. – 2017. – С. 167–171.

122. Чупров, И. В. Исследование взаимосвязи параметров электромагнитных молотов с физико-механическими свойствами горных пород при дроблении негабаритов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Чупров Игорь Валерьевич. – Екатеринбург, 2006. – 22 с.

123. Чэнчжи, Ц. Ч. Ц. Математическое моделирование зонального разрушения массива вокруг подземных выработок и реверсивного деформирования образцов горных пород / Ц. Ч. Ц. Чэнчжи, Ц. Ц. Ц. Циху, В. М. В. Минян // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2011. – № 3–4 (8–9). – С. 92–120.

124. Шевченко, А. В. Оборудование и технологии для селективного измельчения и перспективы их развития / А. В. Шевченко, А. А. Кравченко, Д. В. Карпачев // Научно-технические технологии и инновации: сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – 29 апреля. – Т. 7. – С. 21–27.

125. Ai, Z. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reversed design / Z. Ai,

Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10. – № 6. – P. 1–12.

126. Akhmadiev, F. G. Mathematical modeling of thin-layer separation of granular materials on sieve classifiers / F. G. Akhmadiev, R. F. Gizzyatov, K. G. Kiyamov // *Theoretical foundations of chemical engineering*. – 2013. – Vol. 47. – № 3. – P. 254–261.

127. Apling, A. Evaluating high pressure milling for liberation enhancement and energy saving / A. Apling, M. Bwalya // *Minerals Engineering*. – 1997. – Vol. 10. – № 9. – P. 1013–1022.

128. Aras, A. Using Artificial Neural Networks for the Prediction of Bond Work Index from Rock Mechanics Properties / A. Aras, H. Özşen, A. E. Dursun // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2020. – Vol. 41. – № 3. – P. 145–152.

129. Artan, U. Towards automatic classification of fragmented rock piles via proprioceptive sensing and wavelet analysis / U. Artan, J. A. Marshall // *2020 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. – 2020. – P. 348–353.

130. Balasubramanian, A. Size reduction by crushing methods / A. Balasubramanian // *University of Mysore*. – 2017. – P. 1–11.

131. Bibikov, P. Y. Investigation of press classification process of weak rocks / P. Y. Bibikov, A. D. Bardovskiy, A. M. Keropyan // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 19. – P. 2552–2554.

132. Brachthäuser, M. Introduction of Roller Press Technology in Far East at «Asia Cement Corporation» in Taiwan as an Example / M. Brachthäuser // *TIZ International Powder-Magazin*. – 1989. – Vol. 113. – № 6. – P. 28–31.

133. Cleary, P. W. Prediction of slurry grinding due to media and coarse rock interactions in a 3D pilot SAG mill using a coupled DEM+ SPH model / P. W. Cleary, R. D. Morrison, M. D. Sinnott // *Minerals Engineering*. – 2020. – Vol. 159. – P. 106–114.

134. Drozdiak, J. A. A pilot-scale examination of a novel high pressure grinding roll/stirred mill comminution circuit for hard-rock mining applications / J. A. Drozdiak // The University of British Columbia. – 2011. – P. 214–240.

135. Hukki, R. T. Proposal for a solomonic settlement between the theorier of von Rittinger, Kick and Bond / R. T. Hukki // Trans. A.I.M.E. – 1961. – Vol. 220. – P. 403–408.

136. Kekec, B. Effect of the textural properties of rocks on their crushing and grinding features / B. Kekec, M. Unal, C. Sensogut // Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material. – 2006. – Vol. 13. – № 5. – P. 385–392.

137. Li, K. Development and application of intelligent decision support system for comprehensive utilization of tailings and waste rocks / K. Li, H. Wang, S. Chen // International Conference on E-Business and E-Government (ICEE). – 2011. – P. 1–4.

138. Lindqvist, M. Energy considerations in compressive and impact crushing of rock / M. Lindqvist // Minerals Engineering. – 2008. – Vol. 21. – № 9. – P. 631–641.

139. Lotter, N. O. Modern process mineralogy: two case studies / N. O. Lotter, L. J. Kormos, J. Oliveira, E. Whiteman // Minerals Engineering. – 2011. – Vol. 24. – № 7. – P. 638–650.

140. Morrell, S. An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits / S. Morrell // International journal of mineral processing. – 2004. – Vol. 74. – № 1 (4). – P. 133–141.

141. Mukhitdinov, D. P. Problems of modeling and control of the technological process of ore grinding / D. P. Mukhitdinov, S. Boybutayev // Chemical Technology, Control and Management. – 2021. – Vol. 21. – № 4. – P. 49–62.

142. Nair, P. B. R. Microfines disk centrifuge pneumatic classifier for fluid energy-based comminution systems / P. B. R. Nair, S. S. Narayanan // Advanced Powder Technology. – 1999. – Vol. 10. – № 2. – P. 145–157.

143. Ostroukh, A. Automated process control system of mobile cone crusher / A. Ostroukh, N. Surkova // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. – 2018. – Vol. 18. – № 2 (1). – P. 173–179.

144. Ostroukh, A. Automated process control system of mobile crushing and screening plant / A. Ostroukh, N. Surkova, O. Varlamov, V. Chernenky, A. Baldin // *Journal of Applied Engineering Science*. – 2018. – Vol. 16. – № 3. – P. 343–348.

145. Pamparana, G. Studying the integration of solar energy into the operation of a semi-autogenous grinding mill. Part II: Effect of ore hardness variability, geometallurgical modeling and demand side management / G. Pamparana, W. Kracht, J. Haas, J. Ortiz // *Minerals Engineering*. – 2019. – Vol. 137. – P. 53–67.

146. Park, J. Use of drilling performance to improve rock-breakage efficiencies: A part of mine-to-mill optimization studies in a hard-rock mine / J. Park, K. Kim // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2020. – Vol. 30. – № 2. – P. 179–188.

147. Sinnott, M. D. Combined DEM and SPH simulation of overflow ball mill discharge and trommel flow / M. D. Sinnott, P. W. Cleary, R. D. Morrison // *Minerals Engineering*. – 2017. – Vol. 108. – P. 93–108.

148. Stapelmann, M. Dry Comminution of Hard-rock Phosphate Ore / M. Stapelmann, C. Gerold, A. Smirnov // *Engineering and Mining Journal*. – 2019. – Vol. 220. – № 5. – P. 36–39.

149. Ulusay, R. Needle penetration test: evaluation of its performance and possible uses in predicting strength of weak and soft rocks / R. Ulusay, Z. A. Erguler // *Engineering geology*. – 2012. – Vol. 149. – P. 47–56.

150. Usov, A. The experience in development of technique and technology of electric pulse disintegration of rocks and ores / A. Usov, V. A. Tsukerman, A. Potokin, D. Ilin // *Rewas 2016: Towards Materials Resource Sustainability*. – 2016. – P. 325–332.

151. Vidal, R. System for classifying rocks by using artificial vision and a robot arm / R. Vidal, A. Cipriano // *ISIE'97 Proceeding of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. – 1997. – Vol. 2. – P. 729–734.

152. Xue J. Soft rock cutting mechanics model of TBM cutter and experimental research / J. Xue, Y. Xia, Z. Ji, X. Zhou // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – 2009. – P. 383–391.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Расчётные данные проведённого исследования

Таблица А.1– Результаты первой ступени исследования ЦКРУП ВП для выявления оптимальной зоны значения y , полученного по условиям линейного приближения на основе метода «крутого восхождения»

Параметры планирования	Исследуемые факторы			Эффекты взаимодействия			Функция отклика (производительность работы установки, Q_T)		
	Частота вращения вала – ω_1	Частота вращения барабана – ω_2	Величина технологического зазора – s				Y_1	Y_2	Y_{cp}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 Код	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3		-	
2 Основной уровень (O)	0,48	0,07	4						
3 Интервалы варьирования (J)	0,05	0,04	2						
4 Верхний уровень (+1)	0,53	0,11	6						
5 Нижний уровень (-1)	0,42	0,03	2						
6 Опыт №1	-	-	+	+	-	-	52,8	51,6	52,2
7 Опыт №2	+	-	-	-	+	-	69,0	69,6	69,3
8 Опыт №3	-	+	-	-	-	+	38,2	38,0	38,1
9 Опыт №4	+	+	+	+	+	+	60,9	60,1	60,5
10 Опыт №5	-	-	-	+	+	+	48,6	48,0	48,3
11 Опыт №6	+	-	+	-	-	+	72,9	71,7	72,3
12 Опыт №7	-	+	+	-	+	-	50,0	50,0	50,0
13 Опыт №8	+	+	-	+	-	-	58,8	57,8	58,3
14 Коэффициенты регрессии b_i и b_{ij}	7,9	-4,4	2,6	-1,3	0,88	-9,1			

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15 $v_i J_i$	0,395	-0,176	5,2						
16 Шаг Δi	0,05	0,04	2						
17 Опыт №9	0,48	0,07	8				74,9	73,9	74,4
18 Опыт №10	0,53	0,03	14				80,3	81,1	80,7
19 Опыт №11	0,58	0	16				77,4	77,0	77,2
20 Основной уровень (O)	0,53	0,03	12						
21 Интервалы варьирования (J)	0,05	0,04	4						
22 Верхний уровень (+1)	0,62	0,07	16						
23 Нижний уровень (-1)	0,48	0	8						
24 Опыт №12	-	-	+	+	-	-	79,6	79,1	79,3
25 Опыт №13	+	-	-	-	+	-	72,6	73,0	72,8
26 Опыт №14	-	+	-	-	-	+	69,8	68,6	69,2
27 Опыт №15	+	+	+	+	+	+	70,3	71,3	70,8
28 Опыт №16	-	-	-	+	+	+	80,8	80,0	80,4
29 Опыт №17	+	-	+	-	-	+	80,4	81,2	80,8
30 Опыт №18	-	+	+	-	+	-	74,3	74,5	74,4
31 Опыт №19	+	+	-	+	-	-	71,2	72,6	71,9
32 Коэффициенты регрессии v_i и v_{ij}	-0,88	-1,1	2,2						
33 $v_i J_i$	-0,044	-0,044	8,8						
34 Шаг Δi	-	-0,04	2						
35 Опыт №20	0,53	0,07	8				82,8	83,0	82,9
36 Опыт №21	0,53	0,03	10				85,0	85,4	85,2
37 Опыт №22	0,53	0	12				80,8	79,8	80,3

Таблица А.2 – Скорректированная матрица ЦКРУП ВП для 3-х факторов ($m = 3$)

	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X	X ₁ X	X ₂ X	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	Y _{из}	Y _{ип}	$\varepsilon = \frac{Y_{из} - Y_{ип}}{Y_{ип}}, \%$	Примечание
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	83,5	83,7	-0,2	Полный факторный эксперимент
2	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	82,7	82,1	0,6	
3	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	78,2	78,2	0	
4	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	77,4	76,6	0,8	
5	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	81,2	81,7	-0,5	
6	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	80,1	78,5	1,6	
7	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	77,3	76,2	1,1	
8	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	74,9	74,6	0,3	
9	+	-1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	81,3	78,6	2,7	Звездные точки
10	+	+1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	84,0	81,9	2,1	
11	+	0	-1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	72,5	70,0	2,5	
12	+	0	+1,68	0	0	0	0	0	+2,83	0	83,4	82,1	1,3	
13	+	0	0	-1,68	0	0	0	0	0	+2,83	83,2	82,1	1,1	
14	+	0	0	+1,68	0	0	0	0	0	+2,83	86,6	85,8	0,8	
15	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84,8	85,2	-0,4	Нулевые точки
16	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84,3	85,2	-0,9	
17	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85,1	85,8	-0,1	
18	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85,4	85,2	-0,2	
19	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84,5	85,2	-0,7	
20	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83,9	85,2	-1,3	

Таблица А.3 – Статистические параметры исследования

Коэффициенты регрессии	ε_0	ε_1	ε_2	ε_3	ε_{12}	ε_{13}	ε_{23}	ε_{11}	ε_{22}	ε_{33}
	85,8	0,93	2,77	0,79	0,187	-0,237	-0,163	-1,74	-3,39	-0,94
Дисперсия	$\sigma_{\varepsilon_0}^2$	$\sigma_{\varepsilon_j}^2$			$\sigma_{\varepsilon_{jl}}^2$			$\sigma_{\varepsilon_{jj}}^2$		
	0,051	0,0221			0,0376			0,022		
Доверительный интервал	$\Delta\varepsilon_0$	$\Delta\varepsilon_j$			$\Delta\varepsilon_{jl}$			$\Delta\varepsilon_{jj}$		
	±0,47	±0,309			±0,404			±0,302		

Таблица А.4 – Анализ уравнения регрессии и эксперимента

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	У _э , %	У _р , %	ε, %	Примечание
1	+	+	+	+	+		84,5	84,7	-0,2	Полный факторный эксперимент
2	+	-	-	+	+		80,5	81,1	-0,6	
3	+	+	-	-	+		80,3	81,1	-0,8	
4	+	-	+	-	+		79,2	79,9	-0,7	
5	+	-1,4	0	0	+1,96		82,2	81,8	0,4	Звездные точки
6	+	+1,4	0	0	+1,96		82,5	82,1	0,4	
7	+	0	-1,4	0	0	+1,96	85,7	84	1,7	
8	+	0	+1,4	0	0	+1,96	79,5	78,8	0,7	
9	+	0	0	0	0		82,7	83,2	-0,5	Нулевые точки
10	+	0	0	0	0		83,2	83,8	-0,6	
11	+	0	0	0	0	0	82,1	82,6	-0,5	
12	+	0	0	0	0	0	81,7	82,6	-0,9	
13	+	0	0	0	0	0	78,3	78,5	-0,2	

Таблица А.5 – Статистические параметры исследования

Коэффициенты регрессии	ϵ'_0	ϵ'_1	ϵ'_2	ϵ'_{12}	ϵ'_{11}	ϵ'_{22}
	5,92	2,79	-3,17	-0,53	0,37	1,31
Дисперсия	$(\sigma_{\epsilon_0}^2)'$	$(\sigma_{\epsilon_j}^2)'$	$(\sigma_{\epsilon_{jl}}^2)'$	$(\sigma_{\epsilon_{jj}}^2)'$		
	0,046	0,029	0,059	0,034		
Доверительный интервал	$\Delta\epsilon'_0$	$\Delta\epsilon'_j$	$\Delta\epsilon'_{jl}$	$\Delta\epsilon'_{jj}$		
	±0,05	±0,403	±0,504	±0,436		

Таблица А.6 – Анализ уравнения регрессии и результатов эксперимента

№ опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	Y _э , %	Y _р , %	ε = (Y _э – Y _р), %	Примечание
1	+	+	+	+	+	+	1,6	1,57	0,03	Полный факторный эксперимент
2	+	-	-	+	+	+	1,7	1,65	0,05	
3	+	+	-	-	+	+	1,1	1,18	-0,08	
4	+	-	+	-	+	+	1,22	1,19	0,03	
5	+	-1,4	0	0	+1,96	0	1,2	1,3	-0,1	Звездные точки
6	+	+1,4	0	0	+1,96	0	1,62	1,55	0,7	
7	+	0	-1,4	0	0	+1,96	1,61	1,67	-0,06	
8	+	0	+1,4	0	0	+1,96	1,15	0,21	0,06	
9	+	0	0	0	0	0	1,32	1,31	0,01	Нулевые точки
10	+	0	0	0	0	0	1,29	1,31	-0,02	
11	+	0	0	0	0	0	1,3	1,31	-0,01	
12	+	0	0	0	0	0	1,34	1,31	0,03	
13	+	0	0	0	0	0	1,33	1,31	0,02	

Таблица А.7 – Статистические параметры исследования

Коэффициенты регрессии	ε ₀	ε ₁	ε ₂	ε ₁₂	ε ₁₁	ε ₂₂
	-5,9	1,65	1,7	-0,043	2,3	0,52
Дисперсия	$(\sigma_{\epsilon_0}^2)''$	$(\sigma_{\epsilon_j}^2)''$	$(\sigma_{\epsilon_{jl}}^2)''$	$(\sigma_{\epsilon_{jj}}^2)''$		
	0,177	0,17	0,21	0,14		
Доверительный интервал	Δε ₀	Δε _j	Δε _{jl}	Δε _{jj}		
	±1,027	±1,029	±1,17	±0,68		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Патент на «Измельчитель-классификатор»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 531 438**⁽¹³⁾ **C2**

(51) МПК

B07B 1/00 (2006.01)*B02C 15/00* (2006.01)*B02C 17/02* (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012154291/13, 17.12.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
17.12.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 17.12.2012

(43) Дата публикации заявки: 27.06.2014 Бюл. № 18

(45) Опубликовано: 20.10.2014 Бюл. № 29

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2198746 C2, 20.02.2003. US 7712691
B2, 11.05.2010. SU 1045930 A, 07.10.1983. SU
654284 A, 05.04.1979. SU 360969 A, 16.04.1973.
EP 1479442 A2, 24.11.2004. SU 1722574 A1,
30.03.1992

Адрес для переписки:

119049, Москва, ГСП-1, В-49, Ленинский
проспект, 4, МИСиС, Отдел защиты
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Бибиков Павел Яковлевич (RU),
Бардовский Анатолий Данилович (RU),
Митусов Павел Евгеньевич (RU),
Воронин Борис Васильевич (RU),
Кряжев Николай Михайлович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский
технологический университет "МИСиС"
(RU)

(54) ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-КЛАССИФИКАТОР

(57) Реферат:

Изобретение относится к области измельчения и разделения твердого полезного ископаемого и может быть использовано, например, при обогащении разного вида минерального сырья. Измельчитель-классификатор содержит вращающийся перфорированный барабан 2, установленный на приводных 4 и поддерживающих 5 роликах, и размещенный внутри перфорированного барабана 2 рабочий элемент. Рабочий элемент снабжен индивидуальным приводом и выполнен в виде вала-измельчителя 6 со сменными рабочими рельефными накладками 8, при этом вал-

измельчитель относительно внутренней поверхности перфорированного барабана 2 установлен с регулируемым по высоте зазором 7. Вал-измельчитель 6 и перфорированный барабан 2 посредством индивидуальных приводов имеют возможность изменения частоты и направления вращения, а ось вращения вала-измельчителя 6 расположена на вертикальной оси поперечного сечения перфорированного барабана 2. Измельчитель обеспечивает повышенную эффективность разрушения материала при минимальных энергетических затратах. 3 ил.

RU 2 531 438 C 2

RU 2 531 438 C 2

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Полезная модель «Пресс-классификатор»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **145 970** ⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
B02C 17/16 (2006.01)
B02C 19/22 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013152226/13, 25.11.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.11.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 25.11.2013

(45) Опубликовано: 27.09.2014 Бюл. № 27

Адрес для переписки:

119049, Москва, ГСП-1, В-49, Ленинский
проспект, 4, МИСиС, отдел защиты
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

Бибиков Павел Яковлевич (RU),
Бардовский Анатолий Данилович (RU),
Харитонов Антон Олегович (RU),
Митусов Павел Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный исследовательский
технологический университет "МИСиС"
(RU)

(54) ПРЕСС-КЛАССИФИКАТОР

Формула полезной модели

1. Устройство для классификации тонкоизмельченных минералов на фракции, включающее рабочий орган в виде перфорированного вращающегося барабана, установленного на приводных катках, и вращающегося шнека, размещенного внутри барабана и выполненного в виде шнека с индивидуальным приводом, загрузочный лоток и разгрузочное устройство, отличающееся тем, что диаметр шнека составляет 0,5-0,7 диаметра барабана, направление вращения шнека противоположно вращению барабана, скорость шнека превышает скорость барабана, при этом шнек установлен со смещением вниз по вертикальной и, дополнительным, по горизонтальной осям так, чтобы минимальный зазор был сдвинут в сторону вращения шнека, кроме того, шнек размещен таким образом, чтобы зазор в зоне максимального приближения шнека к внутренней поверхности перфорированного барабана был равен гарантированному зазору, обеспечивающему несоприкосаемость шнека с внутренней поверхностью перфорированного барабана, а шаг и глубина навивки шнека были равны размеру перфорации.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что шнек выполнен с направлением навивки, совпадающим с направлением движения материала от загрузочного к разгрузочному устройству, ширина навивки шнека равна расстоянию между перфорациями барабана, а глубина навивки шнека - размеру перфорации.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что шнек выполнен в виде скрученного круглого стержня с чередующимися впадинами и выступами, при этом шаг между витками совпадает с расстоянием между отверстиями перфорации.

4. Устройство по п.1, отличающееся тем, что разгрузочное окно загрузочного лотка

RU 145970 U1

RU 145970 U1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(обязательное)

Акт внедрения ТОО «Завод Казогнеупор»

<p align="center">«ЗАВОД КАЗОГНЕУПОР» ЖАУАПКЕРШІЛІГІ ШЕКТЕУЛІ СЕРІКТЕСТІГІ</p> <p>111500, ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ, ҚОСТАНАЙ ОБЛЫСЫ, РУДНЫЙ КАЛАСЫ, ШАҒЫН АУДАНЫ, ВНЕРКӘСІП ЗОНАСЫ, ҚҰРЫЛЫС 4046.</p> <p>+7 (71431) 92044 – Кабылдау бөлмесі +7 (71431) 50885 – Сату бөлімі e-mail: inbox@kazogneupor.com</p>	 <p>ЗАВОД КАЗОГНЕУПОР</p>	<p align="center">ТОВАРИЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЗАВОД КАЗОГНЕУПОР»</p> <p>111500, РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН, КОСТАНАЙСКАЯ ОБЛАСТЬ, ГОРОД РУДНЫЙ, МИКРОРАЙОН ПРОМЗОНА, СТРОЕНИЕ 4046.</p> <p>+7 (71431) 92044 – Приёмная +7 (71431) 50885 – Отдел сбыта e-mail: inbox@kazogneupor.com</p>
--	---	--

№ 35

От «30» марта 2017 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ТОО «Завод Казогнеупор»

Тимербулатов С.Б.

АКТ

**Промышленного внедрения методики определения рациональных параметров
функционирования измельчительного и классифицирующего оборудования**

При модернизации технологических схем производства сушеного боксита и порошков глины огнеупорной молотой ТОО «Завод Казогнеупор», в 2015 году в цехах ЦППШ и ЭКЦ была внедрена методика определения рациональных параметров функционирования измельчительного и классифицирующего оборудования, разработанная инженером-технологом Митусовым Павлом Евгеньевичем.

Данная методика предусматривает установление конструктивных и режимных параметров оборудования в зависимости от ряда факторов, влияющих на процесс измельчения. На основании этой методики в составе дробильно-сортировочных линий 1 и 2 была изменена конструкция валковых дробилок ДГ -500 и ДГ-1000, таким образом, что каждый валок получил индивидуальный привод с возможностью изменения угловой скорости с помощью частного регулятора электродвигателя.

Внедрение и эксплуатация данной методики позволило выявить, по сравнению с традиционной схемой (с применением стандартного оборудования) следующие преимущества:

- снижение расхода электроэнергии на измельчение бокситов и огнеупорных глин
- более эффективный помол в шаровых мельницах материала прошедшего предварительное измельчение в модернизированных дробилках
- снижение материальных и трудовых затрат

Фактическая экономия себестоимости с 2015 г. по 2017 г. от применения данной методики на производстве сушеного боксита и порошков глины огнеупорной молотой составила 12 351 252 тенге при объёме реализации сушеного боксита 54 000 тонн и порошков глины огнеупорной молотой 4800 тонн. В том числе снижение затрат на электроэнергию 2 863 000 тенге.

Директор ТОО «Завод Казогнеупор»




Тимербулатов С.Б.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

(обязательное)

Сертификат соответствия на железосодержащий продукт

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ	
	<p>СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ</p> <p>№ РОСС RU.AM04.H00320/19</p> <p>Срок действия с 11.11.2019 по 10.11.2022</p> <p>№ 0537328</p>
	<p>ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ</p> <p>рег. № RA.RU.11AM04, Орган по сертификации продукции Общества с ограниченной ответственностью "ВОСТОК-ЗАПАД", 109029, РОССИЯ, город Москва, Сибирский проезд, дом 2, строение 8, комната 4, Тел: +79266288246, E-mail: os.vostok.zapad@gmail.com</p>
<p>ПРОДУКЦИЯ</p> <p>Железосодержащий продукт (отсев железосодержащий магнетитовый), торговая марка ООО «Гермес», Серийный выпуск</p>	<p>КОД ОК 08.12.13.000</p>
<p>СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ</p> <p>СТО-001-40979235-2019</p>	<p>КОД ТН ВЭД</p>
<p>ИЗГОТОВИТЕЛЬ</p> <p>Общество с ограниченной ответственностью «Гермес» Место нахождения: 347935, Россия, Ростовская область, город Таганрог, улица Кузнечная, дом 45, ОГРН 1196196031701 Телефон: +79298023041 E-mail: гермес.tgn@yandex.ru</p>	
<p>СЕРТИФИКАТ ВЫДАН</p> <p>Общество с ограниченной ответственностью «Гермес» Место нахождения: 347935, Россия, Ростовская область, город Таганрог, улица Кузнечная, дом 45 Телефон: +79298023041 Адрес электронной почты: гермес.tgn@yandex.ru</p>	
<p>НА ОСНОВАНИИ</p> <p>протокола испытаний № Г20191111-018 от 11.11.2019 года Испытательной лаборатории Общества с ограниченной ответственностью «Интера», аттестат аккредитации РОСС RU.31787.04ФРЕ06.</p>	
<p>ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ</p> <p>Дата изготовления, срок годности, условия хранения указаны в прилагаемой к продукции товаросопроводительной документации и/или на упаковке и/или каждой единице продукции.</p> <p>Схема сертификации: 3с</p>	
<p></p> <p>Руководитель органа</p> <p>Эксперт</p>	<p>Д.М. Беляев</p> <p>Р.Ф. Мирсатов</p>
<p>Сертификат не применяется при обязательной сертификации</p>	

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

Акт внедрения ООО «Гермес»



Общество с ограниченной ответственностью «Гермес»
ИНН: 6154155710, ОГРН: 1196196031701, КПП: 615401001.
Адрес: 347900, РО, г. Таганрог, ул. Менделеева, 125.
Email: germes.tgn@yandex.ru

№ 1

«УТВЕРЖДАЮ»

От «08» февраля 2021 г.

Генеральный директор ООО «Гермес»

Красин А.Н.

АКТ

Промышленного внедрения методики определения рациональных параметров функционирования магнитного и классифицирующего оборудования

При модернизации технологических схем производства железосодержащего продукта (отсева железосодержащего магнетитового) ООО «Гермес», в 2020 году на производственной площадке была внедрена методика определения рациональных параметров функционирования магнитного и классифицирующего оборудования, разработанная инженером-технологом Митусовым Павлом Евгеньевичем. Данная методика предусматривает установление конструктивных и режимных параметров оборудования в зависимости от ряда факторов, влияющих на процесс магнитного извлечения. На основании этой методики в составе магнитных сепараторов линии доводки мелкодисперсного материала была изменена конструкция магнитного сепаратора ССЖ-150Л и магнитного сепаратора ССЖ-100П, таким образом, что вал сепаратора получил индивидуальный привод с возможностью изменения угловой скорости с помощью частотного регулятора электродвигателя. Внедрение и эксплуатация данной методики позволило выявить, по сравнению с традиционной схемой (с применением стандартного оборудования) следующие преимущества:

- снижение рабочего времени цикла переработки с 30 минут до 25 минут
- более эффективное выделение мелкодисперсного продукта на 3%, что уменьшило потери по продукту, снизив их до 1 %.
- снижение материальных и трудовых затрат

Фактическая экономия себестоимости с 2020 г. по 2021 г. от применения данной методики на производстве железосодержащего продукта (отсева железосодержащего магнетитового) составила 5 460 000 рублей при объеме реализации продукта 4 000 тонн. В том числе дополнительную прибыль за счёт снижения потерь продукта 1 040 000 рублей.

Генеральный директор ООО «Гермес» _____ Красин А.Н.



ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

(обязательное)

Протокол исследований железосодержащего продукта

Протокол исследований (испытаний) и измерений (анализа) №	Г20191111-018	от	11.11.2019	г.
---	---------------	----	------------	----

Испытательная лаборатория Общества с ограниченной ответственностью «Интера»

Сертификат № РОСС RU.31787.04ФРЕ06 от 08.04.2019 г., срок действия до 07.04.2022 г.
 Адрес: 125319, Россия, г. Москва, ул. Чернышевского, д.15, корп.2, эт.1 пом.1 4с; 140070, Россия, Московская обл., городской округ Люберцы, пгт. Толькино, ул. Горького, д.39 стр.3;
 Телефон: +7 (919) 221-43-58. Адрес электронной почты: labra_lab19@mail.ru

Внимание! Перепечатка или размножение настоящего протокола без письменного разрешения испытательной лаборатории не допускается. Настоящий протокол распространяется только на образцы (пробы), подвергшиеся исследованиям (испытаниям) и измерениям (анализу).


 / В.П. Серов /
 МП

Объект испытаний (тип, артикул, модель, марка):	Железосодержащий продукт (отсев железосодержащий магнетитовый), торговая марка ООО «Гермес»
Наименование и адрес изготовителя:	Общество с ограниченной ответственностью «Гермес» Место нахождения: 347935, Россия, Ростовская область, город Таганрог, улица Кузнечная, дом 45
Наименование и адрес заявителя испытаний:	Общество с ограниченной ответственностью «Гермес» Место нахождения: 347935, Россия, Ростовская область, город Таганрог, улица Кузнечная, дом 45
Цель испытаний:	Оценка соответствия СТО-001-40979235-2019
Акт отбора образцов (проб):	Акт отбора заявителя БИИ от 28.10.2019
Метод (методика) испытаний:	СТО-001-40979235-2019
Место проведения испытаний:	Испытательные залы ИП ООО «Интера»
Дата получения объекта испытаний:	28.10.2019
Сроки испытаний:	28.10.2019-11.11.2019
Условия проведения испытаний:	Температура окружающего воздуха 20-22 °С. Относительная влажность воздуха 66...68%. Атмосферное давление 746...750 мм рт. ст.
Испытательное оборудование (указывается при необходимости):	---

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

СТО-001-40979235-2019							
Раздел	Требования/испытания	Результаты/замечания	Заключение				
2	Технические требования						
2.1	Железосодержащий продукт должен соответствовать требованиям настоящего стандарта	Требование выполняется	С				
2.2	Железосодержащий продукт представляет собой твердые частицы преимущественно темного цвета	Требование выполняется	С				
2.3	Химический состав железосодержащего продукта должен соответствовать представленному в таблице 1.	Требование выполняется	С				
		Массовая доля, %					
		Fe2 общ.	Влага	SiO2	Al2O3	CaO	SO3
	Железосодержащий продукт	≤92,0	≤10	≤8,5	≤5,5	≤7	≤0,75
2.4	Массовая доля общей влаги не более 10 % (по согласованию с потребителем, допускается увеличение массовой доли влаги до 15 %)	Требование выполняется 3,2%	С				
2.5	Не допускается загрязнение железосодержащего продукта металлическим ломом, боем кирпича, и другими посторонними включениями	Требование выполняется	С				
2.6	Фракционный состав железосодержащего продукта от 0,01 до 0,1 мм	Требование выполняется 0,03мм	С				
2.7	Железосодержащий продукт упаковке и специальной маркировке не подлежит	Требование выполняется	С				
3	Требования безопасности						
3.1	При производстве железосодержащего продукта должны соблюдаться общие требования безопасности к производственным процессам по ГОСТ 12.3.002-75 ССБТ, к оборудованию, в соответствии с ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ		НП				
3.2	Требования безопасности к рабочим местам, согласно ГОСТ 12.2.051-81 ССБТ, санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны, согласно ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ		НП				

Протокол исследований (испытаний) и измерений (анализа) №	Г20191111-018	от	11.11.2019	г.
--	---------------	----	------------	----

СТО-001-40979235-2019			
Раздел	Требования/испытания	Результаты/замечания	Заключение
3.3	Радиационная безопасность железосодержащего продукта нормируется, согласно санитарных правил СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)»	Требование выполняется	С
3.4	Удельная эффективная активность (А эфф.) естественных радионуклидов железосодержащего продукта должна быть не более 370 Бк/кг	Требование выполняется 108 Бк/кг	С
3.5	Периодические испытания железосодержащего продукта включают определения фракционного состава, засоренности неметаллическими примесями, удельной эффективной активности - не реже одного раза в год		НП
3.6	Железосодержащий продукт пожаро-взрывобезопасен. При переработке концентрата, необходимо соблюдать требования ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ и ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ.		НП

ВЫВОД: по проведенным исследованиям (испытаниям) и измерениям (анализу), образцы (пробы) продукции Железосодержащий продукт (отсев железосодержащий магнетитовый), торговая марка ООО «Гермес» соответствуют требованиям СТО-001-40979235-2019

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

(справочное)

Сертификат участника конференции

