

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**

Научная специальность – 2.8.8. Геотехнология, горные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

ТВЕРЬ – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» на кафедре прикладной физики.

Научный руководитель: **ГОРЛОВ Игорь Васильевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры технологии и автоматизации
машиностроения ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **ХОРЕШОК Алексей Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор,
директор Горного института, профессор
кафедры горных машин и комплексов, ФГБОУ
ВО «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф.
Горбачева»

КУЗИЕВ Дильшад Алишерович, кандидат
технических наук, доцент, доцент кафедры
горного оборудования, транспорта и
машиностроения ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уральский государственный
горный университет»

Защита состоится «29» июня 2023 г. в 12:00 часов на заседании
Диссертационного совета 24.2.410.02 на базе ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет» по адресу: 170026 Тверь, наб.
Афанасия Никитина, д. 22, ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет» и на сайте вуза по адресу:
<https://new.tstu.tver.ru/science/dissertation/24.2.410.02/#pills-defense>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета
24.2.410.02



Афанасьева Людмила Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время особенностям измельчения и классификации пород слабой прочности, таких как тальк, мел, гипс, слабые известняки и др. уделяется недостаточное внимание, как в России, так и за рубежом. В технологических схемах большинства предприятий используются типовое оборудование в виде конусных и валковых дробилок на стадиях среднего дробления и шаровых барабанных мельниц для тонкого измельчения и помола. Оборудование, спроектированное для решения широкого круга задач, использующее традиционные принципы воздействия на измельчаемый материал, такие как сжатие и удар, несет в себе высокую металлоемкость, 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 РФ 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, соответственно) 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 дробления 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, В.А. Атрушкевича, А. Д. Бардовского, В. А. Баумана, Л. А. Вайсберга, Ю.В. Дмитрака, 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, М. 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.

Методы исследования включают научный анализ и обобщение современных представлений в 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.

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 теоретических и экспериментальных зависимостей по критерию Стьюдента достигается при уровне значимости 0,1.

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.

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.

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 № RU2531438C2);

– 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).

Апробация работы. Основные положения и результаты исследования докладывались на Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (2011, 2012, 2013, 2022) на 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).

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; подготовке материалов к публикации.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, из которых 1 входит в библиографическую и реферативную базу «Scopus», 3 работы – в изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК Минобрнауки России, 1 – в издании, входящем в перечень, утвержденный ВАК 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель, идея и положения, выносимые на защиту, дана оценка научной и практической значимости работы, представлена ее реализация.

В первой главе приведен обзор существующих методов измельчения горных пород, выполнен критический анализ существующих конструкций измельчителей и классификаторов, используемых для переработки слабых горных пород. Проведен анализ результатов исследований процесса измельчения в валковых дробилках различных конструкций и методики расчета параметров оборудования для измельчения горных пород. Рассмотрен энергетический метод расчета контактных давлений. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе для решения поставленных задач представлены устройство (рисунок 1) и математическая модель, разработанная на основе энергетического метода расчета контактных давлений, описывающая горную массу, как идеальную жестко-пластичную среду, находящуюся в рабочей зоне измельчителя-классификатора в момент ее разрушения.

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, 10. Попадающий в зазор 7 между валом-измельчителем 6 и перфорированным барабаном 2 материал подвергается высокоэффективному измельчению, и, через отверстия перфорированного барабана (перфорации) 3 попадает в разгрузочное устройство 11.

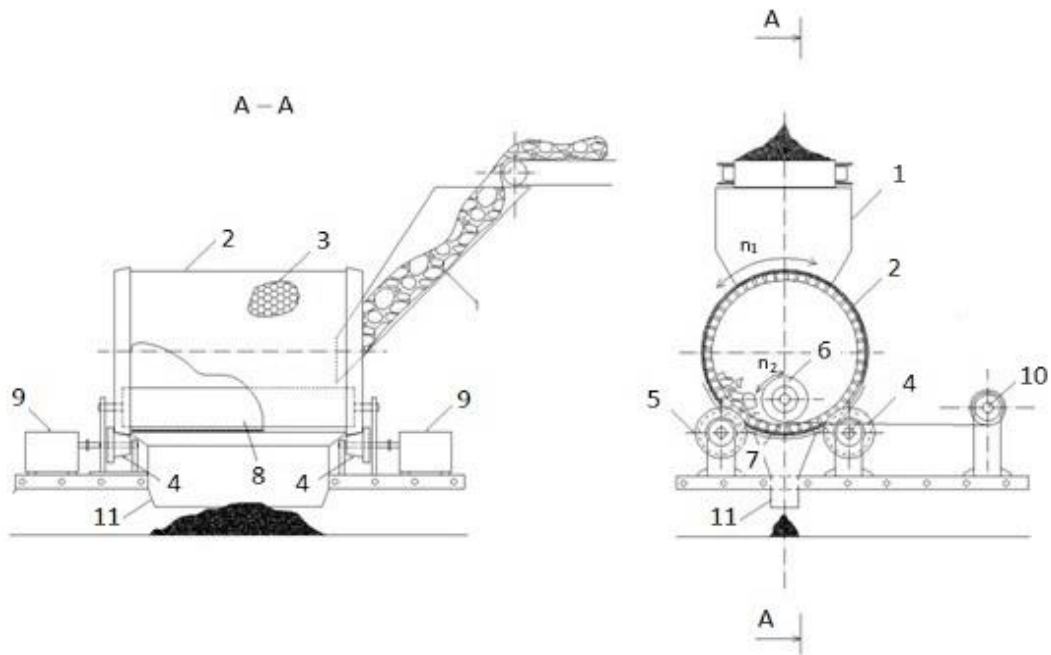


Рисунок 1 – Схема измельчителя-классификатора

Конструкция измельчителя-классификатора аналогична барабанной стержневой мельнице, где в качестве рабочего элемента, установлен вал-измельчитель. Исходя из конструктивных особенностей измельчителя-классификатора, соотношение диаметров вала-измельчителя и перфорированного барабана принято $1/3$, при этом вероятность захвата крупных фрагментов породы будет существенно выше, чем у типовых валковых дробилок, вследствие меньшего угла захвата.

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

При решении задачи по измельчению слабых горных пород можно применить известные зависимости, полученные на основе энергетического метода расчета контактных давлений. Тогда для определения основных параметров деформации необходимо построить возможное поле линий скольжения блоков материала в измельчаемой горной массе, соответствующее условиям рассматриваемого процесса.

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 представлена модель процесса измельчения горной породы в рабочей зоне между валом-измельчителем и перфорированным барабаном.

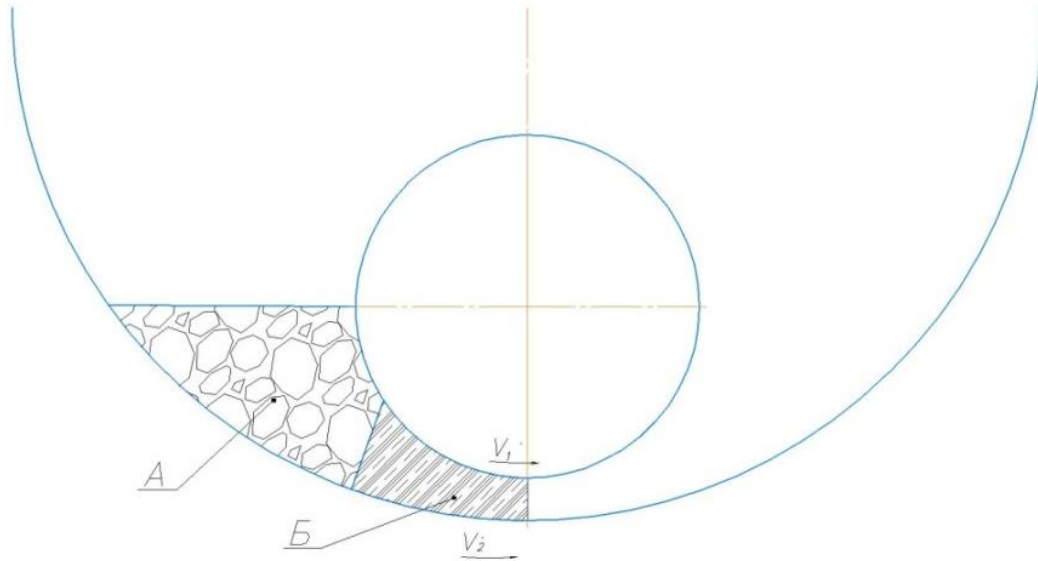


Рисунок 2 – Модель процесса измельчения горной породы в рабочем пространстве между валом-измельчителем и перфорированным барабаном

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

Если тангенциальные скорости вала-измельчителя V_1 и перфорированного барабана V_2 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 и зазором s между валом-измельчителем и перфорированным барабаном (рисунок 2). Скорость изменения зазора V^s можно выразить через расстояние S ($s_1 - s$ – разница зазора между перфорированным барабаном и валом-измельчителем в начале и в конце зоны *B*), отнесенное к времени поворота барабана на угол ω , соответствующий длине сектора зоны *B*.

На рисунке 3 представлена схема зоны *B* и кинематически возможного поля линий скольжения, состоящая из жестких блоков, позволяющая определить давление необходимое для измельчения породы при условии одинаковых тангенциальных скоростей вала-измельчителя и перфорированного барабана.

Используя известные выражения для энергетического метода, из условия равенства мощностей внешних и внутренних сил находим:

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

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.

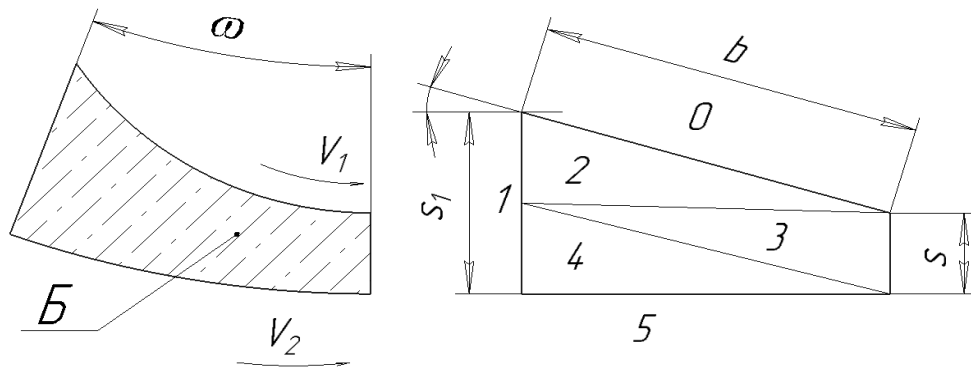


Рисунок 3 – Зона B пластических деформаций (слева) (см. рисунок 2); возможное поле линий скольжения жестких блоков в зоне B (справа)

Если b и v_0 принять за единицы длины и скорости, удельное усилие для процессов плоской деформации будет определяться по формуле:

$$q/2k = 0,5 \left(\sum_i^1 v_i l_i + 2\mu \sum_j^1 v_j l_j \right), \quad (2)$$

где l_i, l_j и v_i, v_j являются безразмерными длинами и скоростями.

Для определения исходных данных при расчете давления на рабочую поверхность вала-измельчителя примем за единицу скорость изменения зазора V^s ; величины разрывов скоростей между жесткими блоками определим, как доли от этой величины, а длины линий скольжения выразим через значение l . При отсутствии проскальзывания деформируемого материала относительно рабочих поверхностей вала-измельчителя и перфорированного барабана выражение 2 примет вид:

$$q/2k = 0,5 \sum_i^1 v_i l_i, \quad (3)$$

где l_i и v_i являются безразмерными длинами и скоростями. Величины их могут быть определены из принятого кинематически возможного поля и соответствующего плана скоростей (рисунок 4).

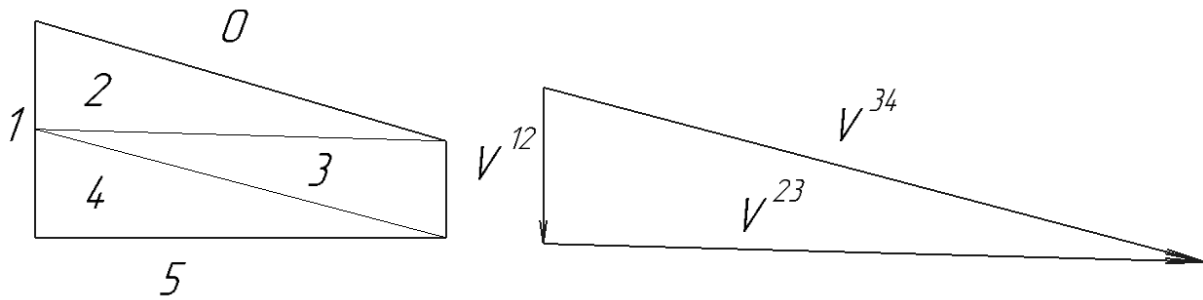


Рисунок 4 – Кинематически возможное поле (слева) и соответствующий план скоростей (справа) при расчете контактного давления q на рабочую поверхность вала-измельчителя (при равных величинах V_1 и V_2)

Используя выражение 3, графоаналитическим методом было рассчитано давление на рабочие поверхности при изменении зазора между валом-измельчителем и перфорированным барабаном (рисунок 5).

С уменьшением зазора давление на рабочую поверхность вала-измельчителя увеличивается, причем, при отношении b/s более 10 интенсивность роста снижается. Это можно объяснить тем, что пластическая деформация распространяется в сторону меньшего сопротивления, то есть в сторону, обратную направлению движения измельчаемой горной породы.

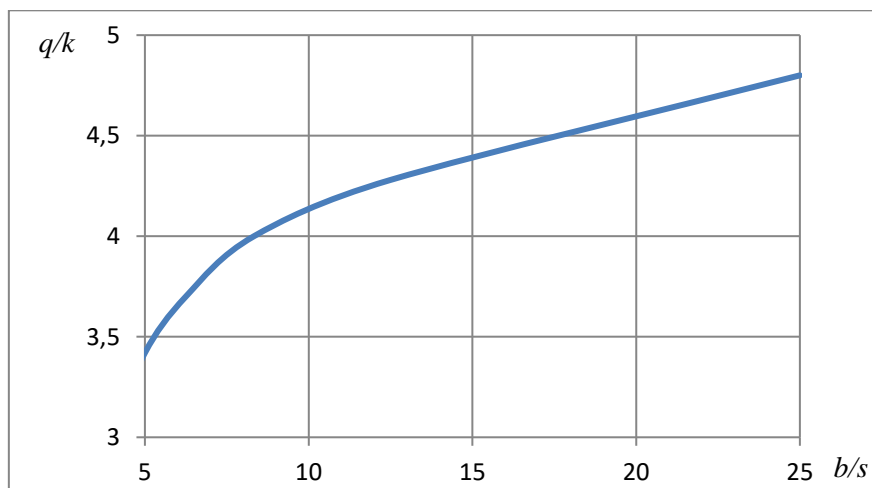


Рисунок 5 – Изменение давления q на рабочие поверхности при изменении зазора между валом-измельчителем и перфорированным барабаном (b/s – отношение длины рабочей поверхности к величине зазора)

Если тангенциальная скорость вала-измельчителя V_1 выше тангенциальной скорости барабана V_2 , то возникает относительная тангенциальная скорость V^r , с ростом которой, меняется направление и величина результирующей скорости V^x . При условии $V_1 = 2V_2$ получим результирующую скорость сближения рабочих поверхности вала-

измельчителя и перфорированного барабана V^x и соответствующий план скоростей (рисунок 6).

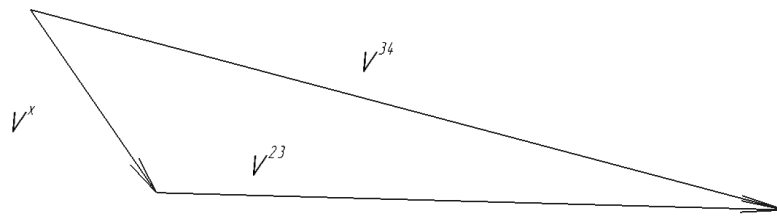


Рисунок 6 – План скоростей движения блоков при $V_1=2V_2$:
 $(V^{34}$ - разрыв скоростей между блоками 3 и 4,
 V^{23} - разрыв скоростей между блоками 2 и 3) (см. рисунок 4)

Если скорость V_1 будет в три раза больше скорости сближения V_2 , то вектор скорости V^x совпадает по направлению с вектором скорости V^{34} , следовательно направление V^x совпадает с направлением вектора главных касательных напряжений. В этом случае получим минимальное значение давления $q=k$.

Используя выражение 3, предложенное поле линий скольжения и соответствующие планы скоростей была получена зависимость давления на рабочую поверхность вала-измельчителя (в значениях k) от величины отношения скорости V_1 к скорости сближения V_2 (рисунок 7).

Полученная зависимость показывает, что при определенных соотношениях скоростей V^r можно добиться существенного снижения необходимого для разрушения давления, и, как следствие, потребной мощности, что позволит проводить процесс измельчения более эффективно.

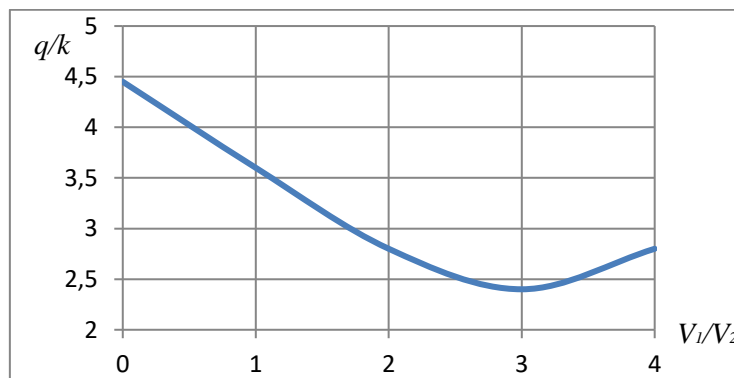


Рисунок 7 – Зависимость давления q на рабочую поверхность вала-измельчителя (в значениях k – предел прочности на сдвиг) от величины отношения скорости V_1 к скорости V_2

Еще одним фактором, влияющим на давление на рабочую поверхность вала-измельчителя, является высота столба поступающего на измельчение материала (рисунок 8). Этот параметр зависит от

интенсивности подачи исходного материала в измельчитель-классификатор.

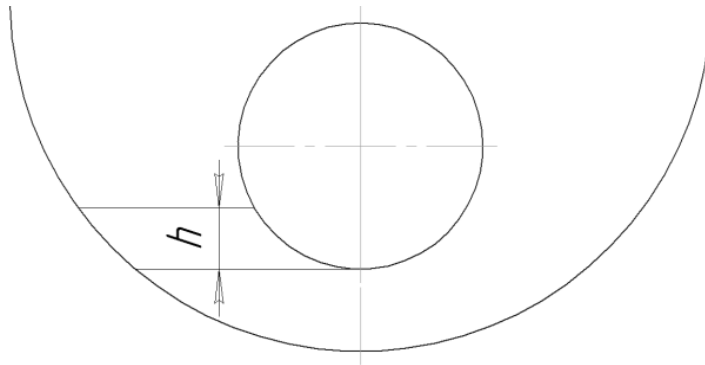


Рисунок 8 – Высота столба h поступающего на измельчение материала

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

$$W = q \cdot l \cdot d \arccos\left(1 - \frac{2h}{d}\right) \cdot V^s, \quad (4)$$

где q – давление на рабочую поверхность вала-измельчителя; l и d – длина и диаметр вала-измельчителя, V^s – скорость изменения зазора s .

Зависимость мощности W , необходимой для измельчения от высоты столба h представлена на рисунке 9. Следовательно, для повышения эффективности процесса измельчения, высота столба h должна быть минимально необходимой для обеспечения подпитки зоны измельчения исходным материалом.

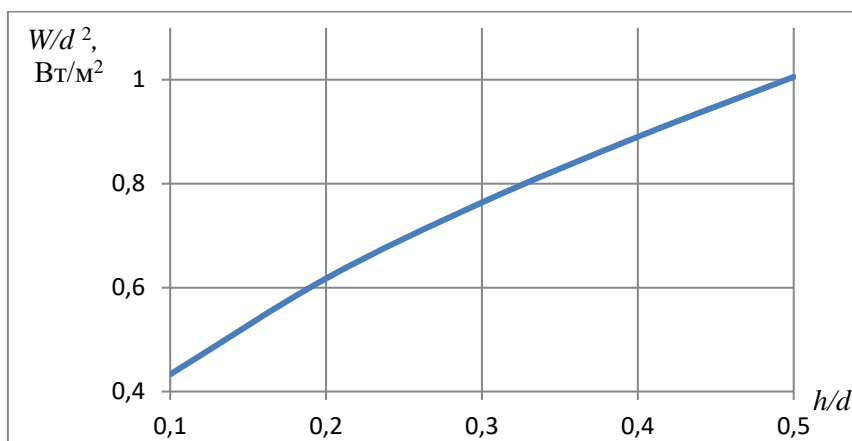


Рисунок 9 – Зависимость мощности W , отнесенной к квадрату диаметра d вала-измельчителя, необходимой для измельчения слабых горных пород от высоты столба h , отнесенной к диаметру вала-измельчителя

На рисунке 10 показана зависимость мощности W , необходимой для измельчения, рассчитанной по выражениям 3 и 4, от величины зазора s между валом-измельчителем и перфорированным барабаном. При изменении величины зазора s меняется давление q и скорость V^s .

Полученная зависимость показывает, что с увеличением зазора s мощность, необходимая для измельчения материала снижается, однако, вместе с этим, снижается производительность 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.

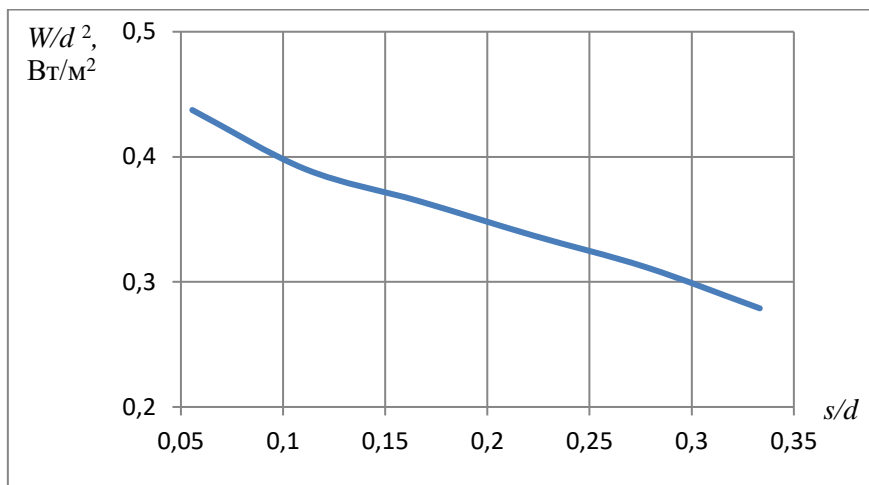


Рисунок 10 – Зависимость мощности W , необходимой для измельчения, отнесенной к квадрату диаметра вала-измельчителя от величины зазора s между валом-измельчителем и перфорированным барабаном, отнесенной к диаметру вала-измельчителя

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

$$Q_o = \frac{\pi}{4} \omega_2 l ((D-s)^2 - (D-s_1)^2) \quad (5)$$

где ω_2 , D , l – угловая скорость вращения, диаметр и длина перфорированного барабана; s , s_1 – наименьший и наибольший зазор между валом-измельчителем и перфорированным барабаном в зоне измельчения B .

Однако с увеличением скоростей вращения пропорционально растет затрачиваемая энергия.

На рисунке 11 показана зависимость объемной производительности агрегата от тангенциальной скорости.

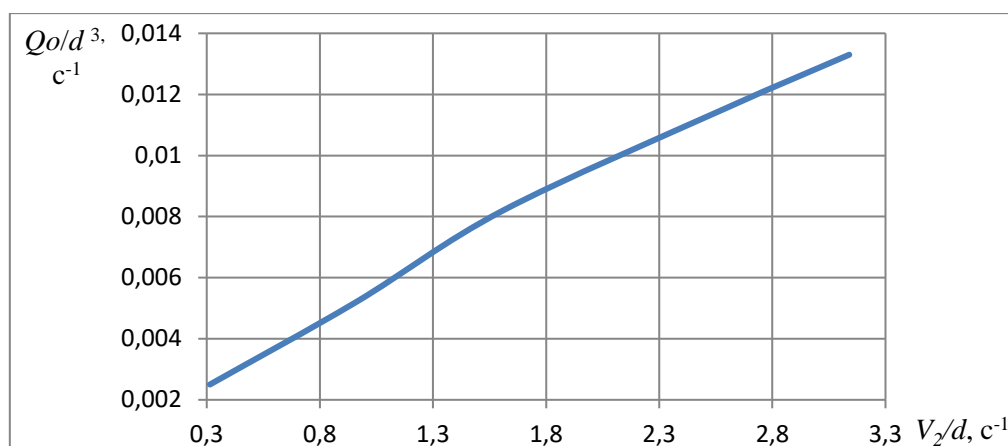


Рисунок 11 – Зависимость производительности измельчения Q_0 , отнесенной к кубу диаметра вала-измельчителя от величины тангенциальной скорости вала-измельчителя, отнесенной к диаметру вала-измельчителя

Теоретическое исследование показало, что эффективность процесса измельчения можно повысить за счет направления вектора суммарной скорости сближения рабочих поверхностей вала-измельчителя и перфорированного барабана V^x вдоль вектора главного касательного напряжения, соответствующего принятому полю линий скольжения, а также за счет увеличения зазора между валом-измельчителем и перфорированным барабаном. Кроме того, необходимо регулировать подачу измельчаемой породы таким образом, чтобы высота столба исходного материала была минимально необходимой с точки зрения производительности процесса.

В третьей главе представлены экспериментальные исследования для проверки гипотез, сформулированных в теоретической части работы. Анализ процесса измельчения, а также способов и методов планирования экспериментальных исследований позволяет сделать вывод об эффективности использования способа активного многофакторного эксперимента, как наиболее соответствующего условиям проведения исследований.

Разработана принципиальная схема лабораторной установки (рисунок 12). Конструкция лабораторной установки аналогична конструкции измельчителя-классификатора (см. рисунок 1) и представляет собой основание 1 с перфорированным барабаном 2 установленным на опорные ролики 3. Внутри перфорированного барабана расположен вал-измельчитель 4 установленный на регулируемых опорах 5. Барабан имеет перфорации для удаления готового продукта из зоны измельчения. Для дозированной подачи исходного материала 7 используется дозатор в виде бункера 6 с управляемой заслонкой 8.

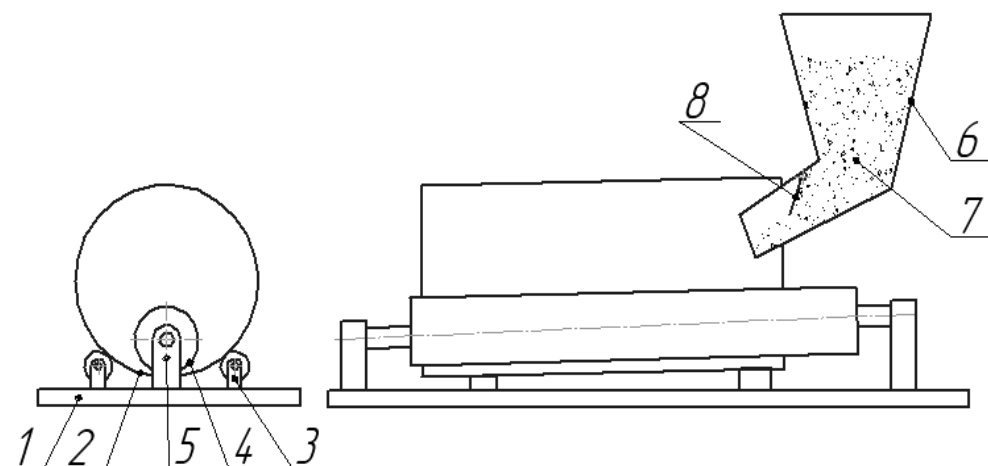


Рисунок 12 – Принципиальная схема измельчителя-классификатора

На рисунке 13 показана созданная по разработанному проекту экспериментальная установка.

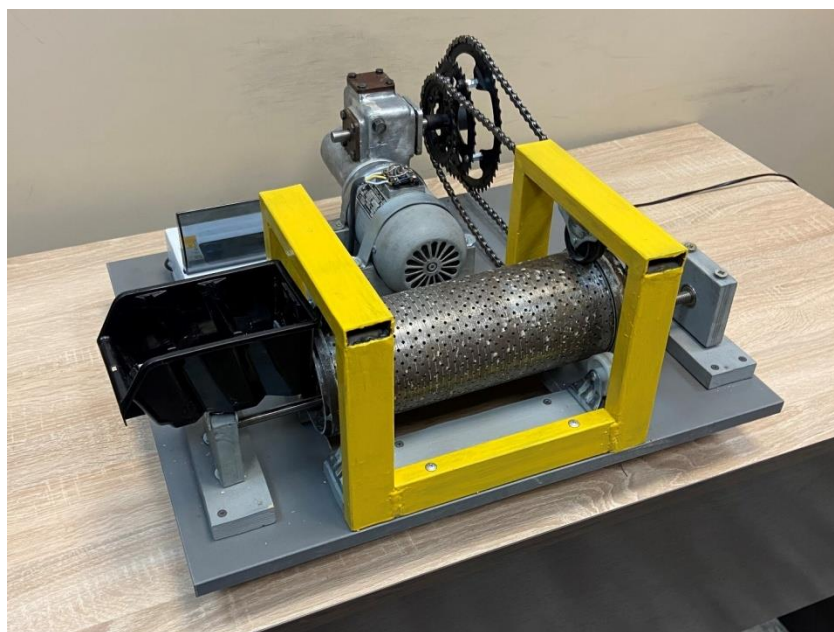


Рисунок 13 – Экспериментальная установка

Установка представляет собой перфорированный барабан, установленный на станине с роликовыми опорами под углом 2° к горизонтальной поверхности. Внутренний диаметр барабана составляет 103 мм, длина – 360 мм. Внутри барабана расположен вал-измельчитель диаметром 36 мм, закреплённый с двух сторон в цапфах с возможностью изменения зазора относительно внутренней поверхности барабана. Вращение барабана и вала-измельчителя осуществляется посредством двух ролико-пластинчатых цепей. На торцевой поверхности барабана закреплён набор из 5 зубчатых звездочек, а на вале-измельчителе – из 6 зубчатых звездочек, необходимых для ступенчатого изменения частот вращения

барабана и вала-измельчителя. На раме станда уставлен мотор-редуктор мощностью 800 Вт, на выходном валу которого закреплены приводные звездочки барабана и вала-измельчителя.

Для проведения экспериментальных исследований по измельчению слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами на экспериментальной установке в качестве исходного материала, использовались гипс, тальк, мел, каолинит, серпентинит.

С целью уменьшения количества опытов при сохранении точности эксперимента и для определения влияния различных факторов по силе воздействия и направлению изменения фактора установлен относительный уровень значимости каждого фактора. В решаемой задаче в качестве функции отклика, выбрана производительность агрегата Q_r по готовому (подрешётному) продукту, требуемого фракционного состава, который выражается в процентах от общего количества измельченной массы.

На первом этапе определялась степень влияния частот вращения вала-измельчителя и перфорированного барабана, а также технологического зазора на производительность Q_r . По результатам экспериментов на основе метода центрального композиционного ротатабельного униформ-планирования было получено уравнение регрессии:

$$Q_r = 194,17 + 756,36\omega_1 + 789,62\omega_2 + 0,0063s - 696,12\omega_1^2 - 2118\omega_2^2 - 0,0376s^2 \quad (6)$$

которое адекватно описывает зависимость производительности установки Q_r от частоты вращения вала-измельчителя ω_1 , частоты вращения перфорированного барабана ω_2 , величины технологического зазора s между валом-измельчителем и перфорированным барабаном.

Полученное выражение может быть использовано для анализа процесса измельчения при изменяющихся параметрах исследования. По результатам анализа полученных данных была определена оптимальная область исследуемого процесса ($\omega_1 = 0,53 \text{ c}^{-1}$; $\omega_2 = 0,17 \text{ c}^{-1}$; $s = 10 \text{ мм}$). Данная область является центром для проведения следующей серии экспериментов.

По достижению оптимальной области поверхности отклика были выполнены дополнительные испытания, позволяющие проанализировать зависимости производительности по готовому продукту от изучаемых факторов ω_1 , ω_2 и s при фиксации двух из них.

Результаты исследований представлены в виде графиков зависимости производительности по готовому продукту Q_r и объемной производительности Q_o от V_I и s (рисунки 14, 15).

Изменение тангенциальной скорости вала-измельчителя V_I при величине технологического зазора $s = 16 \text{ мм}$ снижает производительность по готовому продукту на 3–10 %. Данная производительность повышается при $s = 3 \text{ мм}$ на 2–4 %, при этом максимум производительности Q_r всегда смещается в сторону увеличения тангенциальной скорости V_I .

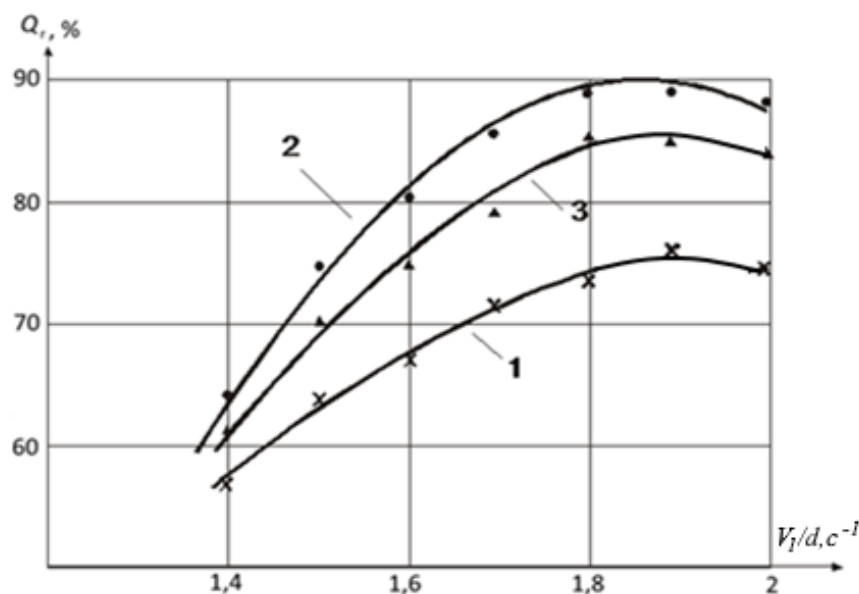


Рисунок 14 – Зависимость производительности по готовому продукту Q_r от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 ($\omega_2 = 0,17 \text{ c}^{-1}$, при $s = 16$ мм – кривая 1; $s = 3$ мм – кривая 2; $s = 10$ мм – кривая 3)

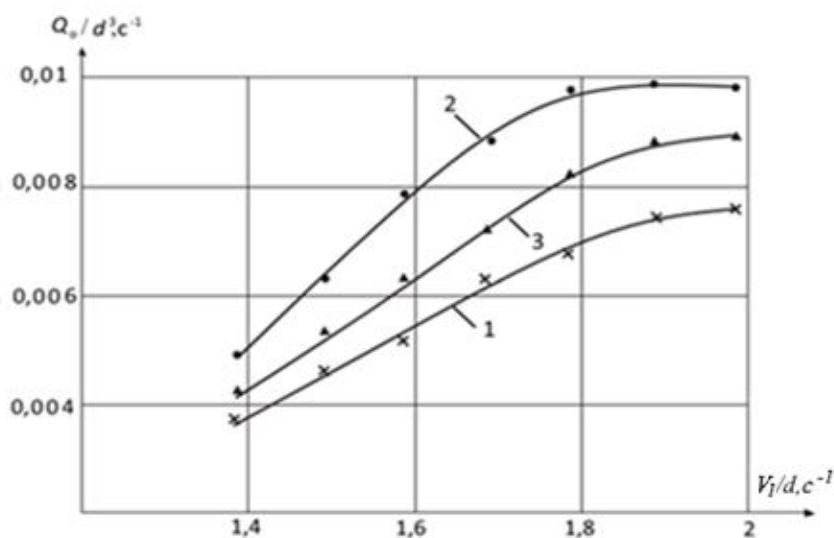


Рисунок 15 – Зависимость объемной производительности Q_o от тангенциальной скорости вала-измельчителя V_1 ($\omega_2 = 0,17 \text{ c}^{-1}$, при $s = 16$ мм – кривая 1; $s = 3$ мм – кривая 2; $s = 10$ мм – кривая 3)

Величины объемной производительности по результатам лабораторных испытаний получились несколько ниже, чем при теоретических расчетах (снижение около 15 % при скоростях V_1 более, чем в 1,7 раза). Это можно объяснить 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.

Эффективность процесса измельчения \mathcal{E} в измельчители-классификаторе можно оценить на основе затрат энергии на процесс измельчения. При этом оценивать эффективность нужно с учетом, как количества произведенного готового продукта, так и с учетом его качества. За основной показатель эффективности измельчения было принято отношение необходимой мощности W к производительности Q_n процесса измельчения материала до соответствующего фракционного состава. Однако, затраты энергии на измельчение зависят и от размера рабочих органов измельчителя. Поэтому эффективность установки учитывалась по удельной мощности ΔW , приходящейся на единицу площади контактной поверхности агрегата:

$$\mathcal{E} = \Delta W / Q_n, \quad (7)$$

где $Q_n = Q_o \times Q_r / 100$.

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 2,5/1 эффективность измельчения установки повышается более чем на 30 %.

На рисунке 16 показаны зависимости эффективности измельчения от отношения V_1 / V_2 для различных значений технологического зазора s .

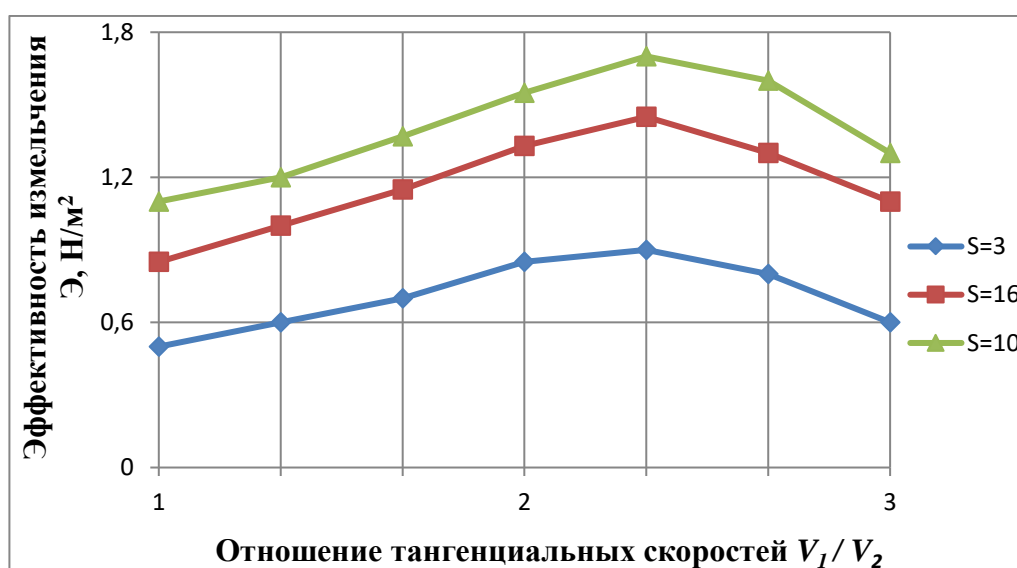


Рисунок 16 – Зависимости эффективности от отношения V_1 / V_2 для различных значений технологического зазора s

В четвертой главе изложена методика анализа рациональных параметров измельчителей для переработки слабых горных пород. На рисунке 17 представлен алгоритм получения рациональных параметров функционирования измельчителей для слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами.

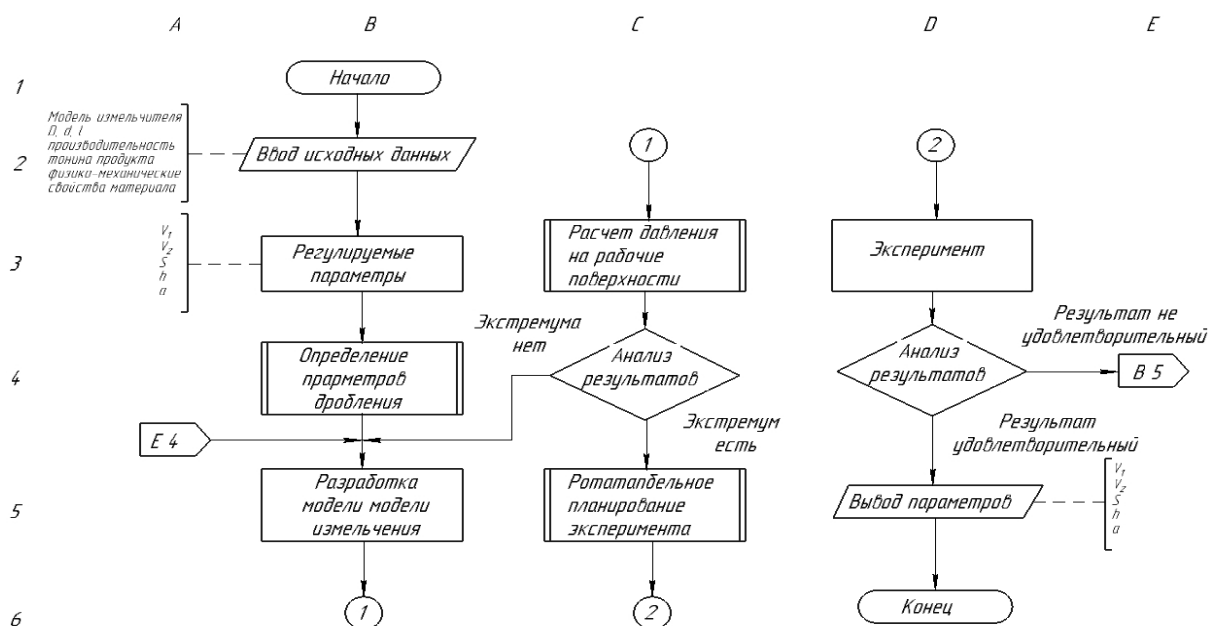


Рисунок 17 – Алгоритм получения рациональных параметров функционирования измельчителей для слабых горных пород, обладающих пластическими свойствами

При модернизации технологических схем производства сушеного боксита и порошков глины огнеупорной ТОО «Завод Казогнеупор» в 2015 году в цехах ЦПШ и ЭКЦ была внедрена методика определения рациональных параметров функционирования измельчительного и классифицирующего оборудования, представленная алгоритмом на рисунке 17.

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 была изменена конструкция валковых дробилок ДГ-400×250 и ДГ-1000×550, таким образом, что каждый валок 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 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 огнеупорной молотой глины составила 12 351252 тенге при объёме реализации сушеного боксита 54000 тонн и порошков огнеупорной молотой глины 4800 тонн. В том числе снижение затрат на электроэнергию составило 2 863000 тенге.

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

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 до 25 минут;
- более эффективно выделять мелкодисперсный продукт с увеличением его на 3 %, что уменьшило потери по продукту, снизив их до 1 %.

Снижение себестоимости в 2020 и 2021 г. за счет использования данной методики на производстве железосодержащего продукта составила 5 460 000 рублей при объёме реализации продукта 4 000 тонн. В том числе дополнительную прибыль за счёт снижения потерь продукта 1 040 000 рублей.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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 счет 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, который обеспечивает измельчение материала за счет комбинированного нагружения с одновременной классификацией готового продукта.

2. На основе энергетического метода расчета 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 вала-измельчителя и барабана с перфорацией. 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 перфорированного барабана 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 подрешётного 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS

1. Горлов И.В., Митусов П.Е., Беляев А.М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь, 2022. № 6. С. 44–47. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-44-47>.

**Публикации в рецензируемых научных изданиях,
рекомендуемых ВАК РФ**

2. Бибииков П.Я., Бардовский А.Д., **Митусов П.Е.**, Харитонов А.О. Агрегат для переработки слабых горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2014. № 4. С. 24–27.

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

4. Бибииков П.Я., Бардовский А.Д., **Митусов П.Е.**, Калакуцкий А.В. Разработка конструкции измельчителя-классификатора для переработки слабых горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-техн. журнал), 2015. № 8. С. 166–170.

5. **Митусов П.Е.**, Бибииков П.Я., Филиппов А.С. Измельчитель-классификатор для переработки слабых горных пород в условиях современного производственного процесса // Строительные и дорожные машины, 2022. № 8. С. 3–7.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ

6. Горлов И.В., Болотов А.Н., **Митусов П.Е.**, Полетаева Е.В. Анализ разрушения слабых горных пород в процессе дробления // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 15. Тверь. ТвГТУ, 2022. С. 99–107.

Патенты РФ

7. Патент РФ на изобретение № RU 2531438C2 МПК В07В 1/00 Измельчитель-классификатор. Заявка № 2012154291/13: заявл. 17.12.2012 / Бибииков П.Я., Бардовский А.Д., **Митусов П.Е.**, Воронин Б.В., Кряжев Н.М.; заявитель ФГАОУ ВПО «НИТУ МИСиС».

8. Патент РФ на полезную модель № RU 145970U1 МПК В07С 17/16 Пресс-классификатор. Заявка № 2013152226/13: заявл. 25.11.2013 / Бибииков П.Я., Бардовский А.Д., Харитонов А.О., **Митусов П.Е.**; заявитель ФГАОУ ВПО «НИТУ МИСиС».