

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»



*На правах рукописи*

**БАЛДАЕВА Татьяна Михайловна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ**

Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор, академик РАН  
**Леонид Абрамович Вайсберг**

Санкт-Петербург – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРОБЛЕМАМ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ .....	10
1.1 Современное состояние изученности процесса вибрационного грохочения минерального сырья.....	10
1.1.1 Краткий обзор основной литературы.....	10
1.1.2 Основные определения.....	15
1.2 Оборудование для ситового разделения сыпучих материалов по крупности .....	17
1.2.1 Классификация оборудования для разделения материалов по крупности ...	17
1.2.2 История развития вибрационной технологии грохочения .....	23
1.3 Основные проблемы технологии вибрационного грохочения.....	26
1.4 Технологические приемы повышения эффективности и производительности вибрационных грохотов.....	27
1.5 Цель и задачи исследования .....	29
Выводы по первой главе.....	31
ГЛАВА 2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРОХОЧЕНИЯ КАК ФУНКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА, ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСЕИВАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	32
2.1 Эффективность грохочения полезных ископаемых.....	32
2.2 Исследование зависимости показателей вибрационного грохочения от значимых свойств сыпучего материала и параметров вибраций.....	33
2.3 Усовершенствованная математическая модель вибрационного грохочения сыпучих материалов.....	35
2.4 Эффективность предварительного отсева мелких классов при вибрационном грохочении .....	48
2.5 Усовершенствованная технология, обеспечивающая повышение эффективности грохочения за счет одновременного бокового выделения мелких классов.....	50
Выводы по второй главе .....	52
ГЛАВА 3 МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	53
3.1 Минералогический состав сырья.....	53
3.2 Физические свойства минерального сырья, влияющие на показатели грохочения .....	55

Выводы по третьей главе.....	61
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГРОХОЧЕНИЯ .....	62
4.1 Технологические параметры и особенности аппаратов для проведения исследований .....	62
4.2 Вибрационная инерционная установка с круговой траекторией колебаний в вертикальной плоскости .....	63
4.3 Вибрационная установка с прямолинейной траекторией колебаний.....	68
4.4 Вибрационная инерционная установка с круговой траекторией колебаний в горизонтальной плоскости .....	69
4.5 Исследования с предварительным отсевом мелких классов.....	70
4.6 Исследования вибрационного грохочения с одновременным боковым отсевом мелких классов (сита сложной формы).....	74
4.7 Анализ и сравнение полученных результатов .....	78
Выводы по четвертой главе.....	81
ГЛАВА 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ.....	82
5.1 Технико-экономический анализ эффективности разработки.....	82
5.2 Расчет инвестиционной привлекательности проекта (разработки).....	87
5.3 Результаты расчетов .....	89
Выводы по пятой главе.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	90
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	93
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	109

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Технологическая эффективность вибрационного грохочения сыпучих материалов определяет уровень энергетических затрат в операциях дезинтеграции полезных ископаемых, особенно в замкнутых циклах дробления, а в ряде случаев, определяет качество товарных продуктов, например, при обогащении угля, производстве строительного щебня и песка.

В этом направлении выполнен большой объем исследований такими учеными и специалистами, как Бауман В.А., Блехман И.И., Баксдейл Р.Д. (Barksdale R.D.), Вайсберг Л.А., Вонг Г. (Wang G.), Газалеева Г.И., Годэн А.М. (Gaudin A.M.), Зверевич В.В., Картавый А.Н., Коровников А.Н., Олевский В.А., Пелевин А.Е., Перов В.А., Разумов К.А. и др.

В то же время, взаимосвязь значимых свойств перерабатываемого сырья, параметров вибрационных воздействий и технологических показателей грохочения не являлась в этих фундаментальных работах предметом специального внимания, в частности, не изучался вопрос влияния формы вибрационных воздействий (круговых/эллиптических и прямолинейных) на эффективность грохочения. Также не проводились исследования технологии градиентного грохочения непосредственно на ситах сложной формы и не анализировалась такая модель процесса разделения по крупности, которая позволила бы провести количественную оценку энергетических составляющих процесса вибрационного грохочения.

Исходя из сказанного, необходимо уточнение и дальнейшее развитие теории вибрационной классификации сыпучего сырья, позволяющей прогнозировать и рассчитывать операции грохочения с учетом вышеперечисленных особенностей.

Таким образом, важным направлением исследования в этой области следует считать моделирование процесса вибрационного грохочения с учетом факторов вещественного состава для совершенствования и расчета операций грохочения.

**Цель работы.** Установление количественной связи между значимыми физическими свойствами сыпучего материала и параметрами вибрационного грохочения для повышения производительности операции, и, в конечном счете,

эффективности технологических схем рудоподготовки.

**Объект и предмет исследования.** Объектом является сыпучий материал с существенно различными физическими свойствами – два типа рудного сырья и каменный уголь, подлежащие классификации по крупности, и действующие образцы полупромышленных вибрационных ситовых грохотов ГИЛ-051, ГСЛ-051 и Гр-5. Предметом исследования является связь между значимыми физическими свойствами сыпучего материала и параметрами вибрационного грохочения, а также её влияние на эффективность грохочения.

**Идея работы.** Установить основные закономерности процесса вибрационного грохочения минерального сырья в виде сыпучего материала, связанные со значимыми свойствами перерабатываемого сырья и параметрами вибрационных воздействий как научную основу для создания перспективных технологий грохочения.

**Основные задачи исследования:**

1. Оценить влияние значимых физических свойств различных типов перерабатываемого сыпучего материала на показатели грохочения.
2. Изучить особенности прохождения сыпучего материала через сито при различных формах вибрационных воздействий.
3. Развить усовершенствованную технологию грохочения с использованием новых просеивающих поверхностей, обеспечивающую повышение эффективности рудоподготовки.

**Методы исследований.** В работе были применены экспериментальные и теоретические методы исследований. Была проведена серия экспериментов по измерению физических свойств минерального сырья, влияющих на показатели грохочения: коэффициентов трения скольжения и внутреннего трения, истинной и насыпной плотности, шероховатости и текучести. Шероховатость поверхности количественно оценивали с использованием лазерного сканирующего 3D микроскопа Keyence VK-x200 (Keyence Corporation, Япония). Эффективная вязкость сыпучих материалов определялась в вискозиметрах свободного истечения, в том числе с вибрационной инициацией. Гранулометрические

характеристики продуктов и исходного материала были исследованы с помощью анализатора ситового вибрационного АСВ-200 (НПК «Механобр-техника»). Для сравнительных испытаний использовались полупромышленные вибрационные грохоты ГИЛ-051, ГСЛ-051, Гр5, а также вибрационный грохот со сложной просеивающей поверхностью (НПК «Механобр-техника»). Обработка расчетных и экспериментальных данных проводилась методами математической статистики.

**Научная новизна:**

1. Изучено влияние траекторий вибрационных воздействий в различных плоскостях на показатели грохочения в ходе корректного их сопоставления, в том числе, в полупромышленном масштабе.

2. Разработана усовершенствованная технология высокоэффективного вибрационного грохочения сыпучих материалов (Патент РФ № 164464 от 10.09.2016 г.; Патент РФ № 2616042 от 12.04.2017 г.).

Полученные результаты соответствуют паспорту специальности 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых (пп. 2, 3, 6, 7).

**Защищаемые положения:**

1. Существует качественно-количественная связь между основными физическими свойствами твердого минерального сырья и параметрами (частота, форма колебаний) вибрационного грохочения, варьируя которые возможно повысить эффективность процесса.

2. Эффективность и производительность грохочения могут быть повышены за счет использования эффекта градиентного грохочения на ситах сложной формы.

**Практическая значимость работы:**

1. Качественно-количественная связь между физическими свойствами сыпучего материала, траекторией вибрационных воздействий и показателями грохочения различных типов полезных ископаемых.

2. Установление влияния различных траекторий вибрационных воздействий на показатели грохочения в ходе корректного их сопоставления, в том числе в полупромышленном масштабе.

3. Усовершенствованная технология высокоэффективного вибрационного грохочения с использованием действующего макета грохота полупромышленного типоразмера, изготовленного в НПК «Механобр-техника».

4. Методика расчетов реализована в НПК «Механобр-техника» при совершенствовании технологий вибрационного грохочения сыпучих материалов.

5. Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета при проведении занятий по дисциплине «Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению».

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

Работа выполнялась в течение 2015-2019 гг. в период обучения в аспирантуре Санкт-Петербургского горного университета, в том числе при периодическом участии соискателя в следующих научных проектах НПК «Механобр-техника»:

1. Разработка новых высокоэффективных технологий обогащения тонковкрапленных полезных ископаемых и техногенного сырья без применения воды (соглашение с Минобрнауки РФ № 14.579.21.0023 от 05.06.2014 г.).

2. Создание научных основ экологически безопасной переработки неметаллических полезных ископаемых осадочного происхождения (грант Российского научного фонда № 15-17-30015 от 14.07.2015 г.).

3. Вибрационные технологии переработки различных материалов в передовых интеллектуальных производствах - теория, моделирование, основы создания мехатронных комплексов для их реализации (соглашение с Российским научным фондом № 17-79-30056 от 01.08.2017 г.).

**Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждаются лабораторными и полупромышленными испытаниями, сходимостью результатов моделирования с данными эксперимента, а также применением современных средств измерений и использованием стандартных и отраслевых методик.**

**Апробация работы.** Результаты поэтапных исследований, изложенных в диссертации, неоднократно докладывались на научно-практических конференциях, школах, как российского уровня, так и международного: Международная конференция «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья»: Плаксинские чтения – 2016 (НПК «Механобр-техника», Санкт-Петербург, 2016), SOLIDS RUSSIA 2016 – Международная специализированная конференция по технологиям обработки и транспортировки сыпучих материалов (Easyfairs, Санкт-Петербург, 2016), Юбилейный XXV Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2017» (НИТУ «МИСиС», Москва, 2017) и других.

**Личный вклад автора.** Автором проведен обзор и анализ технологических решений для классификации различных материалов на ситовых поверхностях по крупности. Определены задачи и цели исследования, проведены лабораторные и полупромышленные испытания, произведены обработка, анализ и обобщение полученных результатов, а также их апробация и подготовка к публикации.

**Внедрение результатов работы.** На основании выполненных исследований усовершенствованной технологии высокоэффективного вибрационного грохочения создан действующий макет грохота полупромышленного типоразмера при участии производственно-конструкторского подразделения НПК «Механобр-техника». Также разработанная методика расчетов реализована при совершенствовании технологий вибрационного грохочения сыпучих материалов, что подтверждено справкой о внедрении (приложение А).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 22 печатные работы, в том числе 6 работ в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России (в том числе 5 статей в международной базе цитирования Scopus), получено 3 патента.

**Благодарности.** Автор глубоко признателен доктору технических наук, профессору, академику РАН Леониду Абрамовичу Вайсбергу и коллективу кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета за повседневную поддержку и ценные советы на протяжении всей работы.



Автор выражает благодарность коллективу компании НПК «Механобротехника» за содействие в выполнении диссертационной работы.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка и 1 приложения. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 25 таблиц и 36 рисунков. Библиография включает 151 наименование.

## ГЛАВА 1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРОБЛЕМАМ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ

### 1.1 Современное состояние изученности процесса вибрационного грохочения минерального сырья

#### *1.1.1 Краткий обзор основной литературы*

Общемировая тенденция роста добычи и переработки рудного и нерудного сырья требует расширения, углубления и модернизации процессов и оборудования для их подготовки. Полезные ископаемые в большинстве случаев, прежде чем отправиться на дальнейший передел, должны пройти ряд операций обогащения на фабриках, которые, в свою очередь, требуют определенного фракционного состава сырья для достижения технологической эффективности и требуемого качества. Для обеспечения данных требований на предприятиях применяется рудоподготовка - совокупность операций по механической трансформации исходной руды в кондиционную, соответствующую установленным требованиям, в первую очередь по крупности, для последующей экономически выгодной технологической переработки. Рудоподготовка является важным этапом подготовки сырья к дальнейшей обработке, который непрерывно развивается и совершенствуется. К рудоподготовительным процессам относятся дробление, измельчение и грохочение. На рудоподготовку приходится около 30 % себестоимости горно-обогатительного передела в целом и до 70 % общих капитальных и эксплуатационных затрат обогатительного передела.

В целях минимизации расходов на транспортировку и дальнейшую обработку пустой породы в промышленности применяются различные методы, например, предконцентрация руды и сепарация кускового материала в цикле рудоподготовки. В условиях постоянного снижения содержания ценных компонентов в минеральном сырье и истощения запасов подготовка сырья является важным процессом, обеспечивающим сохранение и развитие объемов производства промышленной продукции ряда отраслей промышленности за счёт вовлечения в добычу всё более бедных полезных ископаемых [117]. Ввиду того,

что на рудоподготовку приходится значительная часть стоимости переработки, снижение затрат является актуальной задачей.

Грохочение играет ключевую роль в энергосбережении при дезинтеграции, т.е. в процессах дробления и измельчения. Грохочение является малоэнергоёмким процессом, но оно позволяет реализовать фундаментальный принцип обогатителей «не дробить ничего лишнего». С качественным грохочением связаны также перспективы дальнейшего селективного раскрытия минеральных агрегатов, ставшего в последние десятилетия основной тенденцией при подготовке руд к обогащению. Соответственно, требования к технологическому оборудованию для разделения материалов в этих условиях возрастают. Так же приходится констатировать, что в РФ физический износ работающего оборудования в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности по данным Росстата самый высокий в экономике и приближается к критической отметке 60 %.

В свою очередь, вибрационное грохочение (ВГ), являясь самым эффективным среди методов классификации по крупности сыпучего сырья (гранулярного по международной терминологии), имеет особенное значение в энергосбережении. Для снижения энергозатрат ВГ должно иметь высокую эффективность грохочения (ЭГ) при постоянной интенсификации производства, что требует увеличения единичной производительности используемых технологических агрегатов. В современных схемах рудоподготовки снижение крупности дробленой руды, подаваемой на измельчение, обычно достигается за счет грохочения в замкнутом цикле мелкого дробления и предварительного грохочения перед средним и мелким дроблением. Производительность таких схем зависит от ЭГ, как контрольного в замкнутом цикле, так и предварительно перед средним и мелким [4; 5; 48; 126].

В отечественной горнодобывающей промышленности находятся в эксплуатации несколько тысяч вибрационных грохотов различных типоразмеров, которые обрабатывают около 0,5 миллиарда тонн горной массы в год. Всего в мире перерабатывается около 5 миллиардов тонн горной массы в год и находятся в эксплуатации десятки тысяч виброгрохотов. На операции грохочения приходится

6-8 % общих расходов электроэнергии в циклах обогащения. Как было отмечено выше, операции грохочения напрямую влияют на расход электроэнергии, поскольку точность классификации по крупности определяет суммарную нагрузку на энергоемкое дробильное оборудование. Таким образом, правильный выбор регулируемых параметров грохочения и конструкции грохотов обеспечивает реальное энергосбережение при переработке всех типов рудного сырья. Как было упомянуто ранее, при переработке нерудных полезных ископаемых, а также богатых железных руд грохочение, кроме того, обеспечивает товарное качество конечных продуктов дробильно-сортировочных предприятий [1; 2; 20; 21; 41; 42; 69].

Изучению процесса грохочения посвящено много работ. Так, первое системное описание технологий и оборудования для ВГ минерального сырья с применявшейся в то время низкой частотой колебаний грохота приведено в 1924 г. в монографии одного из основателей института «Механобр» и одновременно профессора Ленинградского горного института Л.Б. Левинсона [73], возглавлявшего техническое бюро «Механобра». Стоит отметить, что значительный вклад в становление вибрационной техники внес именно «Механобр», где с момента его основания в 1920 г. и до нынешнего времени интерес к процессу грохочения является традиционным. В институте разрабатывались и исследовались рациональные схемы надежных в эксплуатации вибрационных возбуждателей колебаний, обеспечивающих интенсивный динамический режим, методики их проектирования и расчета, рациональные конструктивные формы и методы расчета рабочих органов грохотов (коробов) и отдельных их элементов, обеспечивающие их достаточную жесткость и прочность.

В первую очередь следует отметить некоторых ученых и специалистов, внесших наибольший вклад в изучение и создание основ вибрационной техники и процесса грохочения полезных ископаемых - это Бауман В.А., Блехман И.И., Баксдейл Р.Д. (Barksdale R.D.), Вайсберг Л.А., Вонг Г. (Wang G.), Газалеева Г.И., Годэн А.М. (Gaudin A.M.), Зверевич В.В., Картавый А.Н., Коровников А.Н., Олевский В.А., Пелевин А.Е., Перов В.А., Разумов К.А [6; 20; 21; 23-32; 33-45; 48;

51; 83; 91-96; 97; 99; 126; 127; 147].

Во многих работах рассматривается эффект вибрации, её законы, характеристики и возможности [23; 25; 28; 31-32; 34; 46; 85; 118-120].

В работах [6; 99] представлены основы теории процессов рудоподготовки и приведены сведения для выбора и расчета наиболее часто применяемых грохотов.

Так же большое внимание уделяется моделированию процесса ВГ. Так, за последние годы был опубликован ряд работ [63-64; 80; 94; 116; 128; 132; 138-139; 141; 147-150]. Отдельное место отведено математическому моделированию процесса ВГ. Например, в работе [65] рассматривается программа для моделирования процесса ВГ, где слой сыпучей среды представляется в виде массива условных ячеек.

В большинстве трудов по грохочению рассматривается модель наиболее распространенного случая грохочения толстого слоя материала. Например, в работе [43] рассматривается теория ВГ сыпучих материалов и «массово-балансная» модель толстого слоя материала. В данном труде обработано значительное число результатов промышленных испытаний грохотов, показавших, что скорость просеивания сыпучего материала является практически одинаковой для грохотов всего типоразмерного ряда. И на основании этого была предложена универсальная формула для оценки производительности вибрационных грохотов.

В работе [39] авторы описывают модель грохочения, созданную с целью заполнения разрыва между численными и эмпирическими подходами в моделировании. Предложенный метод позволяет проводить моделирование процесса ВГ с высокой точностью без длительной настройки, калибровки и предварительной экспериментальной подготовки, при этом может использоваться для рассмотрения широкого модельного ряда устройств.

Достаточно большое количество работ посвящено изучению тонкого грохочения в обогащении руд. В работе [76] проведен анализ применения тонкого грохочения в обогащении руд цветных металлов. Было установлено, что тонкое грохочение в рудоподготовительных операциях приводит к повышению эффективности процесса классификации, снижению ошламования и повышению

выхода эффективно обогащаемого класса крупности и стабилизации вещественного состава продуктов последующих стадий переработки. Тонкое грохочение полезных ископаемых имеет место и в производстве щебня [9].

В настоящее время внимание так же уделяется тому, чтобы при получении товарного щебня использовать некондиционную мелочь (0-5 мм) для изготовления дополнительной товарной продукции в целях снижения экологического ущерба от складирования отходов [100; 121; 122].

Ряд работ рассматривает применение новых технологий и оборудования для грохочения золотосодержащих руд [112-113].

Из конструктивных составляющих грохотов широко изучена поверхность грохочения [40]. Здесь приводятся основные сведения по просеивающим поверхностям, их классификация и основные требования к ним. Рассматриваются отечественные и зарубежные конструкции металлических, армированных, полимерных и специальных сит и способы их крепления на грохотах.

Было изучено влияние факторов вещественного состава сырья на процесс ВГ [66].

За последние годы были выполнены и опубликованы результаты ряда фундаментальных и прикладных исследований в области нелинейной механики сыпучих сред, в первую очередь минерального сырья, процессов их вибрационной сегрегации и классификации по крупности [70; 75; 79; 84; 92-93; 95-96; 114; 123; 134-135; 143]. Указанные процессы были всесторонне описаны на уровне физики (динамики и кинетики) взаимодействия отдельных частиц и их массива [26; 91; 108; 129].

Учитывая, что вода становится одним из самых дефицитных ресурсов, актуальной темой является снижение использования так называемых «мокрых» процессов при обогащении [7; 8]. Например, при обогащении углей используется значительное количество пресной воды: от 5 до 10 т. воды на 1 т. угля. При этом угли содержат высокий процент зольной фракции (15-20 %), что влечет за собой складирование внушительного объема отходов сжигания углей (золы и шлаков) [8]. Таким образом, необходимо использование сухих методов обогащения углей.

Авторы данной работы установили целесообразность использования термохимической модификации высокозольных каменных углей и ее влияние на эффективность обогащения.

Ряд работ [30; 49-50; 71; 106; 109; 110] рассматривает реологические свойства сыпучих материалов, влияющие на показатели рудоподготовки.

В последнее время широкое распространение получили грохоты, в которых поддерживается равномерная толщина надрешетного слоя. Для них характерны высокая пропускная способность и высокий КПД. Так, в работе [131] рассматривается вибрационный грохот с равномерной толщиной слоя материала. Авторы утверждают, что данный грохот имеет более высокую ЭГ по сравнению с обычными вибрационными грохотами (примерно на 3-8 %), особенно при работе с большим количеством материала.

Можно сделать вывод, что процессу грохочения посвящено большое количество трудов, которые рассматривают как основные сведения, конструктивные особенности, моделирование процесса грохочения, методы расчета грохотов, так и конструктивные составляющие и факторы вещественного состава. В настоящей работе, по-видимому, впервые делается попытка обобщающего энергетического описания процессов вибрационной классификации по крупности сыпучих сред.

### ***1.1.2 Основные определения***

Грохочение является процессом разделения сыпучего кускового материала на классы крупности путем просеивания его через одну или несколько расположенных последовательно либо параллельно просеивающих поверхностей с калиброванными отверстиями. В качестве просеивающей поверхности обычно используют металлические или полимерные сита различных конструкций.

По типу применения различают следующие виды грохочения:

– *вспомогательное грохочение*, используемое в схемах дробления исходного материала, включая предварительное перед дроблением, контрольное, или поверочное, в замкнутом цикле после дробления и совмещенное, в тех случаях,

когда предварительное и контрольное объединяют;

- *подготовительное грохочение*, предназначенное для разделения материала на несколько классов крупности для последующей раздельной обработки;

- *самостоятельное грохочение* – для выделения классов, являющихся готовыми сортами и отправляемых потребителю;

- *обезвоживающее грохочение* – для удаления основной массы воды, содержащейся в материале после его промывки [4; 5; 21; 33; 40; 62].

Аналогичные терминологические определения применительно к обогащению углей приведены в ГОСТ 17231-2015: Уголь. Обогащение. Термины и определения [54]. Принципиальная технологическая схема обогащения углей приведена на Рисунке 1.1.

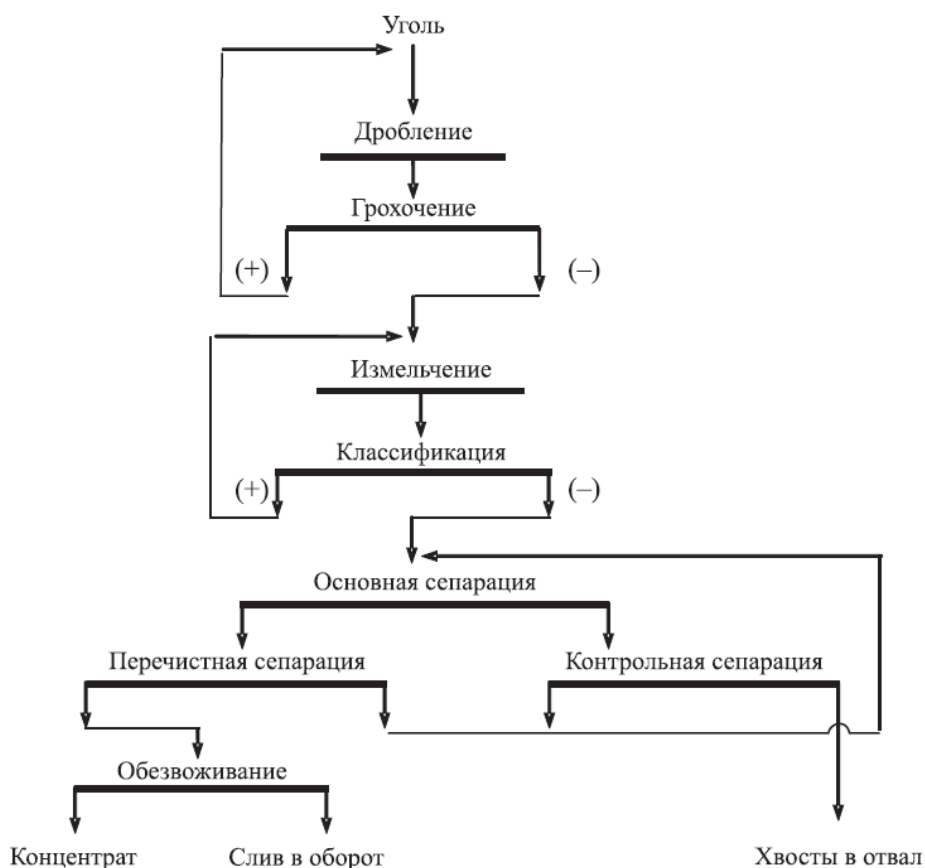


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема обогащения углей [1]

ВГ применяется чаще всего в циклах дробления твердого минерального и техногенного сырья. Также грохочение производится для разделения исходного



материала по крупности на классы перед последующими операциями кускового обогащения (концентрации) или для получения товарного продукта необходимой крупности. В ряде случаев грохочение позволяет повысить качество получаемой продукции, если вредные примеси отличаются по крупности от целевого продукта в результате избирательной дезинтеграции.

Исходя из максимальной крупности куска в исходном питании принята приведенная в Таблице 1.1 градация, разработанная в «Механобре».

Таблица 1.1 - Классификация видов грохочения [40]

Вид грохочения	Крупность исходного материала, мм	Размер отверстия просеивающей поверхности, мм
Крупное	-1200	100...300
Среднее	-350	25...60
Мелкое	-75	6...25
Тонкое	-10	0,5...5
Особо тонкое	-1	до 0,05

Порядок грохочения может быть установлен от крупного класса к мелкому и от мелкого класса к крупному.

## **1.2 Оборудование для ситового разделения сыпучих материалов по крупности**

### ***1.2.1 Классификация оборудования для разделения материалов по крупности***

Грохот представляет собой устройство, используемое для разделения кускового и сыпучего материала, твердой фазы пульпы и суспензий на продукты различной крупности с помощью просеивающих поверхностей с калиброванными отверстиями.

Все выпускаемое оборудование можно разделить на следующие группы:

- по расположению просеивающей поверхности:
  - а) наклонные грохоты (в некоторых случаях вертикальные);
  - б) горизонтальные грохоты (или слабонаклонные).
- по форме рабочей поверхности:
  - а) плоские грохоты (неподвижные грохоты, частично подвижные грохоты, плоские подвижные грохоты);

- б) барабанные вращающиеся грохоты;
- в) дуговые грохоты.
- по характеру движения просеивающей поверхности или способу перемещения сыпучего материала:
  - а) неподвижные грохоты (с неподвижной просеивающей поверхностью);
  - б) частично подвижные грохоты (с движением отдельных элементов просеивающей поверхности);
  - в) вращающиеся грохоты (с вращательным движением просеивающей поверхности);
  - г) гидравлические грохоты (грохоты с перемещением материала в струе воды или пульпы);
  - д) плоские подвижные грохоты (с колебательным движением всей просеивающей поверхности) [40; 115].

В качестве примера неподвижных грохотов может быть указан колосниковый грохот. Необходимо отметить, что грохочение рудного материала крупностью 800-1200 мм осуществляется только на неподвижных грохотах колосникового типа.

Колосниковый грохот имеет простейшую конструкцию и состоит из неподвижных решеток, собранных из балок фасонного сечения (зачастую используются старые рельсы, металлические балки или фигурные брусья различного профиля), установленных под углом 30-45 град. к горизонту. В редких случаях решетки устанавливаются горизонтально. Материал попадает на верхнюю часть решетки и под действием силы тяжести продвигается по решетке, куски мельче заданного размера проваливаются через щели решетки (подрешетный продукт), а куски крупнее покидают грохот в нижней части (надрешетный продукт). В основном применяется для крупного грохочения с размером щели между колосниками от 50 до 200 мм. Колосниковые грохоты требуют минимального обслуживания, отличаются высокой прочностью и простой конструкцией, при этом обладают невысокой эффективностью разделения по крупности.

Вращающиеся барабанные грохоты характеризуются просеивающей поверхностью, имеющей цилиндрическую или коническую форму. Поступающий внутрь барабана материал под действием вращения продвигается по внутренней поверхности. В случае необходимости получения нескольких классов крупности, просеивающая поверхность барабана составляется из нескольких секций с различными отверстиями от мелкого к крупному. Цилиндрический барабан имеет малый угол наклона к горизонту (4-7 град.), конический барабан обычно устанавливается без наклона. Барабанные грохоты малых размеров вращаются на центральном валу, а большие на наружных опирающихся на ролики бандажах. Барабанные грохоты применяются для промывки глинистых руд, улавливания скраба или крупных кусков руды, разгружаемых из шаровых или стержневых мельниц вместе с пульпой, промывки и сортировки щебня, гравия и песка, а также для сортировки асбестового волокна и для отсева графитового концентрата. Достоинством является возможность грохочения без ударов и вибрации, т.е. полностью в динамически сбалансированном режиме. Недостатками – низкая ЭГ, истирание материала о просеивающую поверхность при движении и громоздкость конструкции.

В гидравлических грохотах перемещение материала по ситовой поверхности осуществляется под действием воды, таким образом выделение мелких классов происходит непосредственно из пульпы. В основном выделяют дуговые, конические циклонные и плоские гидравлические грохоты, применяющиеся для тонкого грохочения. Данные грохоты получили широкое распространение в технологических процессах обогащения руд цветных и черных металлов: на первой стадии измельчения в схемах гравитационных фабрик, где крупность разделения находится в пределах от 3,0 до 1,6 мм, на последующих стадиях измельчения и доизмельчения, где требуемая крупность разделения составляет от 1,0 до 0,074 мм и в циклах доводки продуктов обогащения, где необходимо предварительно разделить материал на узкие классы крупности в интервале от 0,5 до 0,040 мм.

Особо следует отметить самый распространенный в горной промышленности тип вибрационных грохотов - плоские грохоты с колебаниями в вертикальной

плоскости и грохоты с прямолинейными колебаниями, включающие инерционные наклонные грохоты, самобалансные грохоты и грохоты с самосинхронизирующимися вибровозбудителями. Грохоты оснащаются коробами с установленными в них просеивающими ситовыми поверхностями, имеющими удлиненную прямоугольную форму. Короба установлены на упругих опорах или значительно реже подвешены к раме грохота и совершают возвратно-поступательные, круговые и близкие к круговым движения. В наклонных грохотах с орбитальными в вертикальной плоскости колебаниями загружаемый в приемную часть короба материал продвигается от загрузочного к разгрузочному концу грохота благодаря силе гравитации и транспортирующими подбрасывающими движениями короба к разгрузочному концу. Простейшая схема устройства плоского качающегося грохота с орбитальными колебаниями – наклонный под углом 12-18 град. к горизонту короб на четырех пружинных опорах с эксцентриковым виброприводом. В грохотах с прямолинейными колебаниями материал продвигается от загрузочного к разгрузочному концу грохота по слабонаклонному (до 4 град.) или горизонтальному ситы под действием колебаний с углом результирующего вектора 15-30 град. к горизонту, обеспечивающих скачкообразное перемещение материала по ситовой поверхности. Наиболее распространенная схема плоского грохота с направленными прямолинейными колебаниями – это короб на четырех пружинных опорах с вибровозбудителем, включающим два кинематически не связанных между собой электродвигателя с дебалансами, работающих в противофазе, и использующим явление самосинхронизации роторов, открытое в «Механобре» в конце 1940-х годов. До середины 1950-х годов генерация прямолинейных колебаний грохота в мировой практике достигалась за счет шестеренчатого механизма привода от двух электродвигателей. Явление самосинхронизации роторов явилось эпохальным моментом в технике и технологии горного машиностроения и детально описано в [24, 98]. Достоинствами плоских качающихся грохотов являются высокая ЭГ, удобство контроля и замены сит. Самосинхронизирующиеся грохоты потребляют на 10-15 % электроэнергии больше, чем инерционные грохоты с орбитальным

движением за счет расходования энергии на горизонтальное транспортирование материала, но при этом требуют существенно меньшей монтажной высоты для установки. Наиболее совершенные конструкции плоских вибрационных грохотов имеют межремонтный ресурс подшипниковых узлов и виброприводов в целом свыше 10 тыс. ч.

В современной промышленной практике основную долю рынка (более 90 %) занимают именно плоские вибрационные грохоты широкой типоразмерной гаммы и различного технологического назначения, различающиеся между собой особенностями перемещения просеиваемого материала, способом возбуждения вибраций, типом и параметрами динамических режимов, количеством просеивающих (ситовых) поверхностей и др.

По динамическим признакам вибрационные грохоты подразделяются по [107]:

1. способу возбуждения колебаний:
  - с дебалансным вибровозбудителем;
  - с электромагнитным вибровозбудителем.
2. количеству вибровозбудителей:
  - с одним;
  - с двумя и т.д.
3. способу синхронизации работы вибровозбудителей (если их более одного):
  - с принудительной механической синхронизацией;
  - с самосинхронизацией;
  - с принудительной электрической синхронизацией.
4. соотношению вынуждающей и собственных частот:
  - дорезонансные;
  - резонансные и околорезонансные;
  - зарезонансные;
  - межрезонансные.

5. форме колебаний рабочего органа – короба:

- с круговыми колебаниями и близкими к ним;
- с прямолинейными (направленными) колебаниями;
- с эллиптическими колебаниями;
- с комбинированными колебаниями (неоднородным полем колебаний).

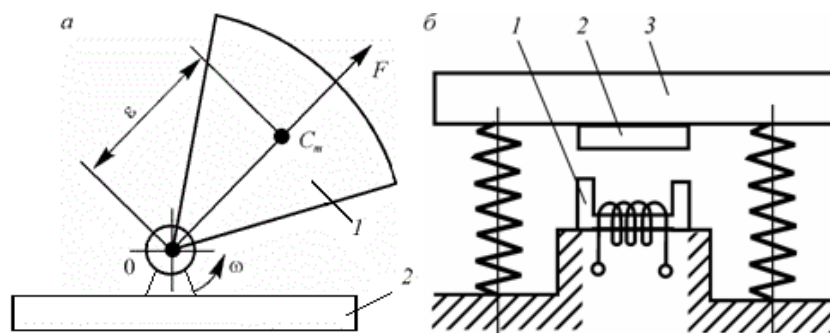
В литературе довольно часто встречается разделение грохотов в зависимости от насыпной плотности исходного материала (Таблица 1.2), например, приведенное в недавно отмененном стандарте [56]:

Таблица 1.2 – Классификация грохотов в зависимости от насыпной плотности исходного материала [56]

Тип	Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>	Область применения (отрасль промышленности)
Легкий (Л)	до 1,4	Угольная
Средний (С)	до 1,8	Строительных материалов
Тяжелый (Т)	до 2,8	Горнорудная

Вибрационный грохот оснащен вибрационным (динамическим/силовым) приводом. Главной отличительной особенностью является то, что при используемом в нем динамическом приводе характер колебательного движения, амплитуда и форма траектории грохота определяются исключительно динамическими факторами – силовым воздействием, генерируемым приводом, т.е. возмущающей силой, количеством движущихся масс и их значением, а также количеством, расположением и характеристиками упругих элементов.

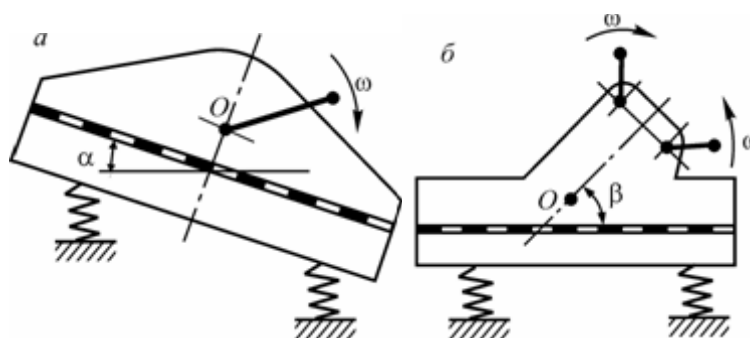
Вибрационный привод, он же вибровозбудитель, в большинстве конструкций является центробежным (дебалансным), гораздо реже – электромагнитным (Рисунок 1.2.) [33].



(а – центробежный (дебалансный), б – электромагнитный)

Рисунок 1.2 - Схема вибровозбудителей колебаний [33]

На текущий момент в мире большей частью производимых и эксплуатируемых вибрационных грохотов являются одномассные зарезонансные машины с дебалансными вибровозбудителями. На Рисунке 1.3. представлены их схемы.



(а – наклонный грохот с круговыми и близкими к ним колебаниями; б – горизонтальный грохот с прямолинейными колебаниями)

Рисунок 1.3 - Динамические схемы одномассных зарезонансных грохотов с дебалансными вибровозбудителями [33]

### 1.2.2 История развития вибрационной технологии грохочения

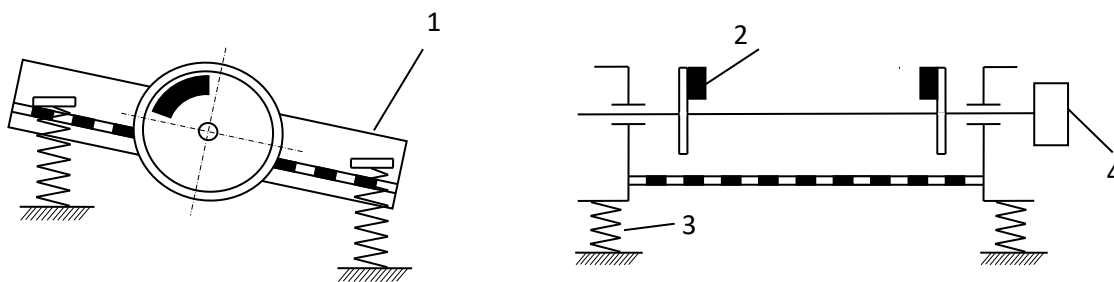
Грохочение является наиболее распространенным процессом на добывающих и перерабатывающих минеральное сырье предприятиях. В горно-обогатительной технологии данный процесс был использован более чем 250 лет назад при сортировке товарного угля, при этом он довольно длительное время выполнялся исключительно на ручных ситах. Только в конце XVIII века стали появляться первые машины для ситовой классификации – барабанные вращающиеся грохоты, а ещё через 50 лет, в середине XIX века, – плоские качающиеся грохоты, приводимые в движение тем или иным видом кинематического привода.

Первыми вибрационными грохотами принято считать аппараты, созданные Берартом в середине XIX века. Грохоты Берарта имели следующие характеристики:

- частота: 100-160 кол/мин;
- амплитуда: 3-5 см;
- амплитудное ускорение не превышало 1,5G.

Чуть позднее появились разработки Маркуса, Баума, Лауэ, Феррариса и др., однако такие грохоты имели весьма низкую производительность и эффективность отсева [82].

Первым инерционным грохотом считается разработка Бомона, предложенная в 1900 г. Колебания рабочей поверхности грохота вызывались за счет инерционно вращающихся дебалансных масс (Рисунок 1.4). Регулировка амплитуды колебаний регулировалась за счет изменения массы дебалансных грузов и уменьшения радиуса их вращения. Причем жесткость амортизационных пружин следовало выбирать таким образом, чтобы собственная частота колебаний инерционного грохота была значительно ниже, чем сообщаемая от дебалансов.



(1 – короб с ситом; 2 – дебаланс; 3 – пружинные рессоры; 4 – клиноременная передача от электродвигателя)

Рисунок 1.4 - Схема инерционного грохота [97]

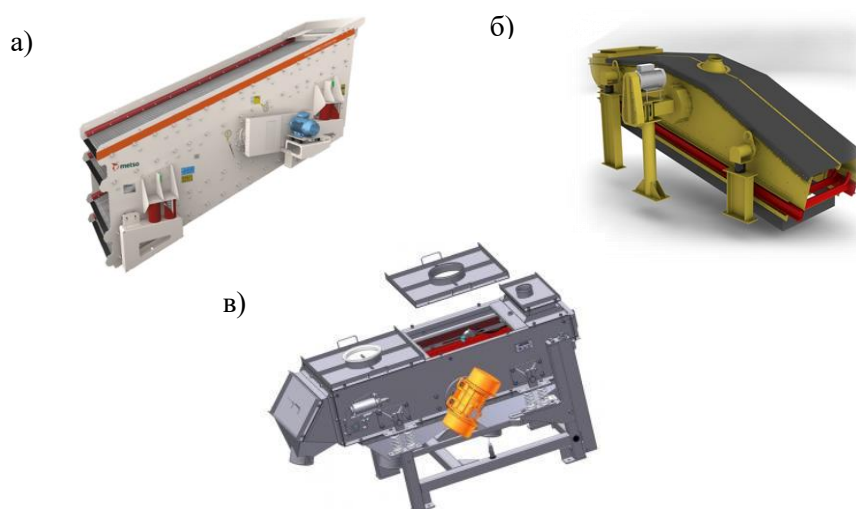
Некоторым недостатком инерционных грохотов является прохождение через резонанс при запуске и, особенно, при остановке грохота. Кинетическая энергия вращающихся дебалансов, деталей передачи и ротора электродвигателя переходит в энергию резонансных колебаний и происходит «застревание» в режиме, близком к резонансному, сопровождающееся интенсивными колебаниями корпуса грохота (эффект Зоммерфельда).



Круговые движения короба грохота обеспечиваются взаимодействием двух вращающихся масс – короба грохота и дебалансными грузами. Так как силы тяжести системы уравновешиваются силами упругости подвесок, то центр масс системы должен оставаться неподвижным, поэтому при вращении вала короб получает круговые движения некоторого радиуса в вертикальной плоскости относительно центра масс системы.

Возможно возникновение резонансных колебаний большой амплитуды и продолжительности при критической частоте вращения вала вибровозбудителя. Это зачастую является причиной поломки грохота, во избежание поломки необходимо применение вибровозбудителей с дебалансом, управляемым центробежной силой инерции. Данные самоустанавливающиеся вибровозбудители имеют регулируемый эксцентриситет. Начальный эксцентриситет очень мал и удерживается, пока не будет пройдена область критической частоты вращения. Затем центробежная сила дебаланса преодолевает усилие пружины и дебалансные грузы переходят в рабочее положение, характеризующееся большим радиусом вращения [5; 6].

Вибрационные грохоты с управляемым дебалансом (Рисунок 1.5) получили ограниченное распространение как у отечественных производителей, так и за рубежом.



(а – грохот серии COMPACT производства Metso Corporation [140];  
 б – грохот серии BIVITEC производства Binder+Co AG [102];  
 в – грохот ULS1506.12I производства Kroosh Technologies Ltd [104])

Рисунок 1.5 - Инерционные грохоты

Среди вибрационных грохотов, следует выделить особый подкласс – резонансные грохоты (Рисунок 1.6). В них реализована идея аккумуляции энергии возвратно-поступательного движения короба в упругих связях [5]. Иными словами, энергия расходуется только на преодоление сил сопротивления колебаниям, что позволяет использовать привод сравнительно малой мощности при большой площади грохочения.



Рисунок 1.6 - Грохот резонансный производства Binder+Co AG [103]

Однако в отечественной и мировой практике грохоты данного типа не нашли широкого применения по ряду причин:

1. Относительная сложность конструкции в виду большого количества шарниров, пружин, резиновых упругих элементов и других конструктивных элементов;
2. Большая металлоемкость в сравнении с другими типами грохотов, например, грохоты ГРЛ имеют металлоемкость 1400-1700 кг/м<sup>2</sup>, а самобалансные грохоты – 600-900 кг/м<sup>2</sup>.

### **1.3 Основные проблемы технологии вибрационного грохочения**

Несмотря на особое внимание к теме ВГ среди исследователей, все еще остаются проблемы, требующие решения. К ним можно традиционно отнести повышение ЭГ, увеличение производительности процесса, а также обеспечение его надежности. К характеристикам надежности и качества вибрационного грохота относится стабильность, коэффициент усиления вынуждающей силы и уравновешенность [33].

Для разделения материалов на подавляющем большинстве предприятий

используются грохоты различных модификаций. Причем они могут устанавливаться как при подготовке материала к обогащению, так и как основной аппарат для получения конечного продукта. Несмотря на обилие моделей и типов вибрационных грохотов опыт их использования в промышленности показывает, что существуют технологические проблемы, которые не позволяют в полной мере осуществить эффективное разделение сыпучих материалов. Одной из таких проблем является разделение трудногрохотимых материалов. Трудность их разделения заключается в том, что в них присутствует значительный процент зерен крупности, близкой к размеру ячейки грохота, и, попадая в ячейку сита, они испытывают сильное трение со стороны стенок отверстия и заклинивают его.

Процесс грохочения может быть представлен как совокупность трех независимых, но одновременно протекающих процессов: транспортирования материала по ситовой поверхности от зоны загрузки (питания) до зоны разгрузки, сегрегации крупных частиц и прохождения мелких фракций сквозь толщину слоя материала и их просеивания сквозь отверстия в сите. Сложность изучения всех трех процессов и определила тот факт, что, несмотря на длительный опыт создания и эксплуатации грохотов, проблема повышения основных технологических параметров остается актуальной, а моделирование процессов находит свое решение только в последние годы.

Процесс грохочения происходит при двух существенно различных условиях – в «тонком» либо «толстом» слое материала (в свободных или естественных условиях грохочения). По мнению некоторых исследователей, слой, толщина которого превышает удвоенный размер отверстия, уже можно считать толстым, поскольку в нем частицы активно взаимодействуют друг с другом.

#### **1.4 Технологические приемы повышения эффективности и производительности вибрационных грохотов**

Известны способы повышения ЭГ на вибрационных грохотах и в некоторой степени повышения производительности грохотов за счет применения просеивающей поверхности сложной формы, в частности, криволинейной

(вогнутой или выпуклой) формы с одинаковыми по размеру просеивающими отверстиями [40].

Подобная наиболее распространенная технология реализована на самосинхронизирующихся грохотах типа «банан», выпускаемых компаниями «Metso Minerals» и «Aury» (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Грохот AURY типа «банан» (AURY Australia Pty Ltd, Австралия) [101]

Просеивающая поверхность грохота типа «банан» содержит от двух до пяти секций с постепенно уменьшающимся углом наклона, поэтому материал перемещается по изогнутой линии, напоминающей контур банана. Из-за крутого угла наклона первых секций, материал движется с большой скоростью, образуя тонкий слой. Это облегчает отсев мелких частиц в подрешетный продукт. К зоне разгрузки скорость движения материала уменьшается, он дольше находится на сите, что способствует лучшему отделению «трудных» частиц. Грохоты типа «банан» эффективны при грохочении материала с большим содержанием мелкозернистых частиц.

Однако негативным техническим эффектом применения таких устройств является повышение износа сит в области средней и разгрузочной частей грохота.

Известен способ повышения производительности вибрационных классифицирующих устройств за счет классификации толстого слоя разделяемого материала. Такой способ стал возможным за счет использования эффекта вибрационной сегрегации материала по высоте слоя, что позволило создать конструкцию вибрационного классификатора, рабочая просеивающая поверхность

которого состоит из ряда ступенчато расположенных пластин с зазорами между ними [89]. Однако недостатком указанного технического решения является ограниченная область его применения – это устройство применимо только для классификации относительно тонкого (менее 1 мм) и абсолютно сухого материала, например, синтетического абразива корунда.

Имеется интересное техническое и технологическое решение, реализуемое за счет вибрационного ситового аппарата с вертикальной осью симметрии, который имеет вертикальные или наклонные боковые просеивающие поверхности и дополнительную просеивающую поверхность в днище короба [86]. В указанном устройстве реализован способ просеивания частиц, названный авторами градиентной классификацией, преимущественно через боковые стенки, что способствует повышенной эффективности разделения сыпучего материала по крупности. Недостатком указанного технического решения является ограниченная область его применения – это устройство эффективно только при классификации относительно тонкого (менее 1 мм) материала.

Несмотря на определенные технические и технологические недостатки ВГ с использованием просеивающих поверхностей сложной формы, этот опыт открывает пути технологического совершенствования процесса ВГ.

### **1.5 Цель и задачи исследования**

На основании вышеуказанных проблем была сформулирована цель работы, которая заключается в установлении количественной связи между значимыми физическими свойствами сыпучего сырья и параметрами ВГ для повышения производительности операции и эффективности технологических схем рудоподготовки.

Исходя из поставленной цели были определены основные задачи исследования:

1. Оценить влияние значимых физических свойств различных типов перерабатываемого сыпучего минерального сырья на показатели грохочения;
2. Изучить особенности прохождения сыпучего материала через сито при

различных формах вибрационных воздействий;

3. Предложить усовершенствованную технологию грохочения с использованием новых просеивающих поверхностей, обеспечивающую повышение эффективности рудоподготовки.

Ввиду выше обозначенных задач исследования диссертационная работа была разделена на 5 глав.

В первой главе приведен краткий обзор основной литературы по теме исследования, указана основная информация об используемом в ходе работы оборудовании, а также указаны основные проблемы процесса технологии ВГ.

Во второй главе диссертационной работы приведены теоретические выкладки, исходящие из поставленной цели исследования, связанные с изучением зависимости показателей ВГ от значимых свойств сыпучего материала и параметров вибраций. Также, в данной главе фигурирует описание усовершенствованной математической модели ВГ сыпучих материалов на базе так называемой «массово-балансовой модели» процесса ВГ, описывающей наиболее распространенный случай грохочения толстого слоя материала. Помимо этого, приводится теоретическое обоснование для проведения испытаний по предварительному отсеvu мелких классов. Исходя из указанных соображений строится теоретическое предположение о разработке усовершенствованной технологии с целью повышения эффективности ВГ за счет одновременного бокового выделения мелких классов, что является особенно актуальным для легкого сыпучего сырья.

В третьей главе описано используемое в ходе экспериментальных исследований минеральное сырье и его основные характеристики.

В четвертой главе приводятся данные экспериментальных исследований, а также анализ и сравнение полученных результатов.

В пятой главе приведена технико-экономическая оценка повышения эффективности ВГ.

### **Выводы по первой главе**

1. ВГ, являясь наиболее эффективным способом разделения сыпучих (гранулярных) материалов по крупности, играет ключевую роль в энергосбережении при дезинтеграции, так как производительность современных схем обогащения зависит от ЭГ, как контрольного в замкнутом цикле, так и предварительного перед средним и мелким.

2. В ряде случаев, например, при обогащении углей, производстве природных строительных и абразивных материалов точность ВГ определяет товарную ценность конечных продуктов.

3. Грохочению полезных ископаемых посвящено большое количество работ, но до настоящего времени должного внимания не уделялось вопросам влияния траекторий вибрационных воздействий в различных плоскостях на показатели грохочения в ходе корректного их сопоставления в полупромышленном масштабе, а также описания процессов вибрационной классификации по крупности сыпучих сред с энергетических позиций.

4. Существуют технологические приемы, направленные на решение одних из основных проблем технологии ВГ – повышение эффективности и производительности процесса грохочения, но зачастую данные приемы имеют ограниченную область применения. Исходя из этого, можно сделать вывод, что задача по решению основных проблем ВГ по-прежнему является актуальной.

## ГЛАВА 2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРОХОЧЕНИЯ КАК ФУНКЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА, ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСЕИВАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### 2.1 Эффективность грохочения полезных ископаемых

ЭГ является основным показателем, характеризующим работу грохота. Эффективность процесса грохочения  $E$  по классу мельче отверстий сита, т.е. по нижнему классу, представляет собой отношение массы этого класса в подрешетном продукте к массе того же класса в исходном материале. ЭГ рассчитывается общепринятым методом [40]:

$$E = 100\gamma(\beta - \alpha) / \alpha(100 - \alpha), \quad (2.1)$$

где  $\gamma$  – выход подрешетного продукта,  $\alpha$  и  $\beta$  – содержание расчетного нижнего класса в исходном материале и в подрешетном продукте соответственно.

В случае технической невозможности прямого замера выхода подрешетного продукта для расчета ЭГ может быть применена тождественная формула:

$$E = 10^4 (\beta - \alpha)(\beta - \nu) / \alpha(100 - \alpha)(\beta - \nu), \quad (2.2)$$

где  $\nu$  – содержание нижнего расчетного класса в надрешетном продукте.

Зависимость ЭГ от скорости движения материала по просеивающей поверхности имеет максимум при определенном значении скорости.

С увеличением производительности грохота по исходному материалу, при прочих равных условиях, ЭГ понижается.

Эффективность не является исключительно функцией просеивающей поверхности и определяется совокупностью качеств грохота в целом, а также правильностью его применения и уровнем эксплуатации. Однако, просеивающая поверхность как основной рабочий элемент, непосредственно транспортирующий и разделяющий материал, точнее, ее вид, форма и размеры отверстий, материал, из которого она изготовлена, играют вполне очевидную роль.

ЭГ для грохотов различна в зависимости от типа и особенностей грохота.



Например, из описанных ранее аппаратов ЭГ неподвижных колосниковых грохотов колеблется в пределах 50-70 %, так как сильно зависит от содержания мелких классов в поступающем материале и его влажности, барабанные грохоты имеют 60-70 % ЭГ, а достоинством плоских качающихся грохотов является сравнительно высокая ЭГ около 75-93 % [21].

## **2.2 Исследование зависимости показателей вибрационного грохочения от значимых свойств сыпучего материала и параметров вибраций**

Существует множество работ, посвященных изучению влияния различных параметров процесса грохочения на его эффективность. Большое влияние на ЭГ имеет интенсивность процесса просеивания. Факторы, определяющие этот параметр, можно разделить на две группы:

1. Зависящие от исходного материала (форма частиц, насыпная плотность, поверхностная влажность);
2. Зависящие от оборудования характеристика вибраций (частота, амплитуда, направление) и поверхность грохочения (доля живого сечения, площадь, размер, форма и толщина отверстий).

Эти факторы взаимосвязаны. Скорость передвижения материала по просеивающей поверхности грохота определяет толщину материала и время его пребывания на грохоте и зависит как от характеристик аппарата – угла наклона, амплитуды, частоты вибраций сита, так и от свойств материала – формы, плотности и упругих характеристик частиц, коэффициентов трения, гранулометрического состава.

Влияние вышеупомянутых факторов на процесс ситовой классификации представляет большой интерес для научного и инженерного сообщества, что подтверждается множеством классических работ по проблеме. Тем не менее, эти исследования далеки от завершенности – постоянно выходят работы с новыми гипотезами и теориями, объясняющими наблюдаемые явления. В настоящей работе также рассматривается влияние типа вибрационных воздействий на ЭГ.

В работе [146] авторы сделали попытку разработать новый метод для определения скорости движения зернистого слоя на просеивающей поверхности. Данный метод основан на аналитическом описании фаз модели движения частиц. Скорость движения частиц определялась на краях последующих фаз движения, отсюда и название – метод пофазного интегрирования.

В работе [129] было смоделировано влияние режима вибрации на эффективность ситовой классификации на горизонтальных ситах с помощью метода дискретных элементов. Так, по данной модели было установлено, что наибольшая скорость перемещения частиц наблюдается при линейном движении сита, чему, однако же, соответствует низкая ЭГ. При орбитальном движении просеивающей поверхности частицы обладают наименьшей скоростью, но при этом наблюдается высокая ЭГ. Следует отметить, что традиционно грохоты с орбитальными колебаниями имеют наклонную поверхность, что приводит к увеличению скорости вибрационного перемещения классифицируемого материала. Например, в работе [151] было изучено поведение частиц при орбитальном движении традиционного грохота. При этом был сделан вывод, что средняя скорость частиц на деке грохота возрастает в продольном направлении деки. Для моделирования данного процесса был использован также метод дискретных элементов.

На процесс грохочения влияет вероятность просеивания зерен через отверстия сита, которая зависит от производительности грохота по питанию и его конструкции, гранулометрического состава материала, его физических свойств и скорости движения по ситам и т.п. Качество грохочения определяется следующими основными факторами: интенсивностью динамического режима колебаний грохота, удельной нагрузкой на просеивающую поверхность, видом просеивающей поверхности и ее конструктивными параметрами.

При прочих равных условиях чем больше скорость движения материала по просеивающей поверхности грохота, тем меньше вероятность просеивания и тем больше производительность грохота по исходному сырью.

На показатели грохочения также влияют влажность, гранулометрический состав исходного материала, наличие комкующихся примесей, способ грохочения (мокрый или сухой), равномерность подачи исходного материала на грохот, состояние просеивающей поверхности. Влияние физических свойств исходного материала и других отмеченных выше факторов на результаты грохочения учитывается при расчете производительности грохотов вводом соответствующих поправочных коэффициентов, полученных в процессе обобщения многолетнего промышленного опыта.

### **2.3 Усовершенствованная математическая модель вибрационного грохочения сыпучих материалов**

Для дискретной, в т.ч. гетерогенной, среды существует выражение, называемое потенциалом Гиббса, также называемое энергией Гиббса, термодинамическим потенциалом и даже просто свободной энергией  $G$ ,

$$G = H - TS, \quad (2.3)$$

где  $H$  – энтальпия, приращение которой в квазистатическом изобарно-изотермическом процессе равно количеству теплоты, полученному (отданному) системой, а сомножитель  $TS$  (энтропийный инкремент) является произведением абсолютной температуры системы в градусах Кельвина на величину энтропии [72; 81]. Приведенное выше выражение (2.3) является уравнением баланса термодинамических функций механической системы.

Возможность использования потенциала Гиббса для сыпучих сред объясняется статистически большим количеством частиц сыпучего материала и принятым в современной физике представлением о сыпучих средах как о своеобразном гранулярном газе [36; 133; 136-137; 142; 144]. К потенциалу Гиббса не применяется требование к консервативности описываемых систем.

Рассмотрим возможность применения подобного энергетического описания для процесса ВГ сыпучего материала. «Участниками» процесса являются грохот, разделяемое сырье, гравитационное поле и, в незначительной степени, воздух атмосферы.

Приведенные далее выкладки относятся к разделению сухих, однородных по вещественному составу сыпучих материалов, в которых сухое трение – основной параметр, отражающий фундаментальное свойство таких смесей, наряду с истинной и насыпной плотностями перерабатываемого сырья. Этот перечень фундаментальных свойств можно считать исчерпывающим. Все три указанных параметра являются измеряемыми и количественно учитываются в предлагаемом подходе. Данный подход не применим к системам, в которых сыпучий материал находится в агрегированном состоянии, например, под действием электростатических сил. В рассматриваемой системе, включающей грохот, разделяемое сырье, гравитационное поле и атмосферу, не изменяются масса материала, масса машины, упругие свойства частичек разделяемого материала и практически не меняются начальная и конечная температуры.

По определению изменение потенциала Гиббса  $\Delta G$  системы грохот-сырье в гравитационном поле включает потери энергии в конечном виде в форме тепла и некие изменения энтропии системы, происходящие в результате изменения состава (упорядоченности) продуктов разделения по крупности. Интегрально процесс изменения энергии системы при ВГ имеет две группы источников. Первая группа связана с работой собственно вибрационной машины  $W_m$ , вторая группа - непосредственно с работой  $W_s$  классификации сыпучего материала по крупности, которую можно условно назвать «полезной» работой (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Распределение энергетических затрат при грохочении

Работа собственно грохота $W_m$	Работа классификации $W_s$
<ul style="list-style-type: none"> <li>– работа сил трения в подшипниках и в паре ремень-шкив (при ее наличии);</li> <li>– работа упругих и вязко-упругих элементов (пружин и переходных муфт);</li> <li>– работа колебания вала вибровозбудителя;</li> <li>– работа сил инерции при возвратно-поступательном перемещении сырья относительно неподвижной рамы грохота;</li> <li>– потери сопротивления в электросети привода грохота.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– работа сил трения сыпучего материала о поверхность сита и бортов;</li> <li>– работа сил трения частиц материала между собой;</li> <li>– работа ускорения частиц при их подбрасывании и вращении;</li> <li>– потери энергии на сопротивление воздуха при перемещении частиц.</li> </ul>

Сходное, но менее детальное распределение энергетических затрат при ВГ приведено так же в [68].

Ускорением материала при его разгрузке в общем энергетическом балансе можно пренебречь, так как оно компенсируется ускорением материала при его подаче на ситовую поверхность в режиме непрерывного процесса грохочения. В режиме периодической классификации по крупности в закрытом устройстве, например, при ситовом анализе, этот фактор вообще отсутствует.

Таким образом, изменение свободной энергии системы грохот – сырье можно представить, как сумму параметров  $W_m$  и  $W_s$ :

$$\Delta G = W_m + W_s, \quad (2.4)$$

или при постоянной температуре в начале и конце процесса сепарации:

$$\Delta G = W_m + W_s = \Delta H - T\Delta S, \quad (2.5)$$

где  $T$  - равновесная температура системы в градусах Кельвина.

Попытаемся определить фактическую величину энергетических функций и параметров, входящих в выражение (2.5). При рассмотрении выражения становится понятным, что только функцию  $\Delta H$  (изменение энтальпии системы) затруднительно определить экспериментально, но она может быть получена расчетным путем после преобразования выражения (2.5):

$$\Delta H = W_m + W_s + T\Delta S, \quad (2.6)$$

При необходимости  $W_m$  можно определить по величине холостой работы грохота, а  $W_s$  равно разнице общей работы нагруженного грохота  $\Delta G$  и величины  $W_m$ .

Отдельного обсуждения требует экспериментальное определение изменения энтропии системы  $\Delta S$ .

Из определения потенциала Гиббса следует, что изменение энтропийного вклада (инкремента)  $T\Delta S$  тождественно изменению потенциальной энергии системы. В то же время, как известно, одной из классических характеристик энтропии является мера упорядоченности системы. Представим, что проба исходного полидисперсного сыпучего материала и продукты его классификации по

крупности имеют формы свободного правильного конуса. Принятие такой формы для расчетов объясняется тем, что это основная и естественная форма массива сыпучего материала на плоскости в гравитационном поле, разумеется, за исключением монослоя. Именно в таком виде, с некоторой долей идеализации, консолидируется материал в питающих бункерах и емкостях после рассева. После ситовой классификации в простейшем случае получаются два, а в общем случае несколько продуктов рассева, каждый с более узким, то есть с более однородным гранулометрическим составом. То есть, на понятийном уровне энтропия конечных продуктов очевидно меньше энтропии исходного полидисперсного материала. Соответственно, более однородные по крупности продукты рассева обладают меньшей плотностью упаковки, меньшей насыпной плотностью и меньшим сухим внутренним трением в массиве. В идеале разницу потенциальных энергий начальных и конечных продуктов сепарации можно рассчитать, зная энергии взаимодействия множества полидисперсных частиц, составляющих каждую из фракций материала, например, используя разновидности метода дискретных элементов DEM [149]. Однако, учитывая сложность состава массивов реального гранулярного материала, вычислительные трудности такого расчета пока непреодолимы даже с применением современных вычислительных методов. Не случайно в фундаментальной монографии [26] проф. И.И. Блехман указывает, что прямые точные решения сложных вибрационных систем обычно отсутствуют. Поэтому предлагается использовать прием осреднения данных об изменении потенциальной энергии системы. Прием основан на том факте, что меньшему сухому внутреннему трению в массиве соответствует меньший угол естественного откоса. Отсюда возникает предположение, что мерой энтропийного инкремента  $T\Delta S$  свободного конуса сыпучего материала в гравитационном поле может служить условная величина его потенциальной энергии. Для общности рассуждения не столь важно, на какой относительной высоте будут находиться конусы исходного и конечного продуктов рассева – при грохочении, например, на горизонтальном самобалансном грохоте все продукты могут находиться на одной высоте.

Изменение потенциала Гиббса замеряется по общей потребляемой в процессе эксперимента электроэнергии. Параметр  $W_s$  определяется как разность  $\Delta G$  и энергии холостого хода грохота  $W_m$  с распределенной на нем статической нагрузкой, равной массе сепарируемого материала.

В уравнении  $\Delta G - \Delta H + T\Delta S = 0$  величина  $\Delta G$  всегда отрицательна,  $T\Delta S$  процесса разделения по крупности имеет отрицательное значение, а  $\Delta H$  соответствует диссипации энергии системы, определяется расчетным путем и имеет отрицательное значение.

Предлагаемый подход не зависит от числа конечных продуктов разделения, которых на единицу больше, чем количество последовательных просеивающих поверхностей.

В качестве первого примера определения энергетических составляющих процесса ситовой классификации взят процесс разделения по крупности почти идеальной системы шариков свинцовой дроби с графитизированной поверхностью, диаметром 2,25 и 4,75 мм. Сепарацию проводили на ситовом анализаторе с орбитальными колебаниями сит в горизонтальной плоскости с частотой 14 Гц. Сито имело квадратные ячейки со стороной 4 мм. Выбор разделяемой системы объясняется геометрически правильной формой частиц и весьма малыми коэффициентами трения частиц о сито и борта просеивающего устройства, а также малым коэффициентом трения частиц между собой. Силами гидрофобного взаимодействия графитизированных частиц между собой можно пренебречь ввиду практически точечной площади соприкосновения. Результаты расчетов приведены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Энергетические параметры классификации свинцовой дроби (Дж/кг)

$-\Delta G$	$-U_m$	$-U_s$	$-\Delta H$	$-T\Delta S$
168,0	162,0	6,0	168,036	0,036

Далее были проведены в аналогичных условиях исследования вибрационной классификации рудных объектов – дробленой апатитовой руды и медно-никелевой руды крупностью 20 мм. За расчетное время отсева во всех экспериментах принимали время достижения 98 % эффективности разделения по заданному

классу 2,4 мм. Результаты исследований приведены в Таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Энергетические параметры классификации различных видов сырья (Дж/кг)

$- \Delta G$	$- U_m$	$- U_s$	$- \Delta H$	$-T \Delta S$
Апатитовая руда				
1 560,0	1 500,0	60,0	1 560,12	0,12
Медно-никелевая руда				
1 680,0	1 620,0	60,0	1 680,14	0,14

Следует подчеркнуть, что полученные величины относятся исключительно к системе грохот – перерабатываемое сырье в гравитационном поле, а не к отдельно взятому грохоту, поэтому превышение величины энтальпии над замеряемой величиной затраченной энергии (работой) привода грохота компенсируется работой уменьшения потенциальной энергии сырья в гравитационном поле, как бы его «падением». Очевидным образом при этом соблюдается Первое начало термодинамики и закон сохранения энергии в целом.

Более того, энергетическая картина разделения сыпучего материала под действием вибрации принципиально не меняется даже при отсутствии физической разделительной перегородки в виде сита. Это явление в форме сегрегации по крупности почти всегда имеет место в надрешетной зоне в первой половине вибрационного грохота от точки загрузки, когда материал поступает на грохот и перемещается толстым слоем. В явлении вертикальной вибрационной сегрегации полидисперсного материала роль множества «сит» выполняют более крупные частицы, пропускающие вниз частицы меньшего размера [29; 40; 43].

На Рисунке 2.1 приведен пример бесситовой вибрационной классификации керамических шариков с одинаковой удельной плотностью крупностью 8 и 3 мм при вертикальных колебаниях с виброускорением 2G.



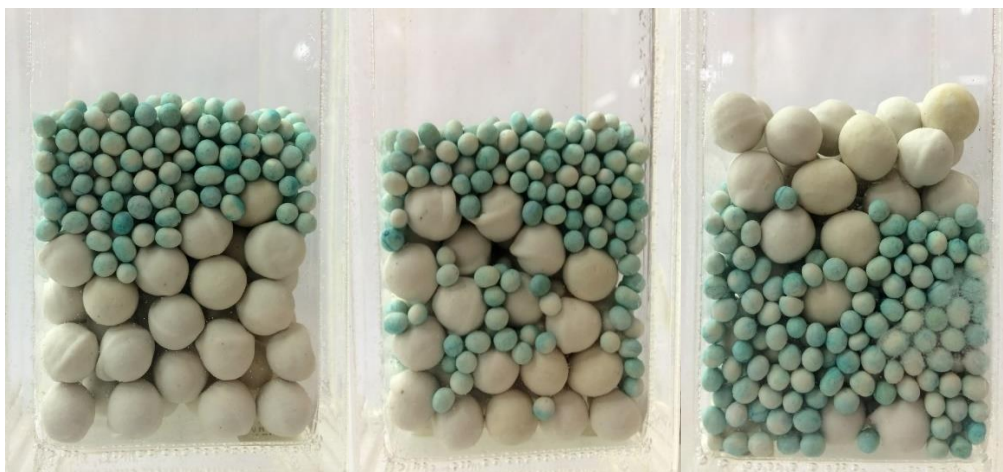


Рисунок 2.1 - Пример бесситовой вибрационной классификации по крупности

В условиях, когда в системе отсутствует физическая разделительная ситовая поверхность, процесс сегрегации может быть обратимым, то есть, может быть реализован процесс усреднения материала по крупности. При инверсии процесса, то есть при усреднении, изменение энтропии системы положительно, а энтальпия меньше энергии, затраченной приводом.

Отметим, что приведенные выкладки по энергетической оценке составляющих процесса сепарации по крупности представляют не только познавательный интерес. Так, полученные данные о существенном изменении реологических свойств гранулярного материала при его разделении по крупности могут использоваться в качестве оценочных параметров, например, при конструировании новых типов вибрационных грохотов с просеивающими поверхностями сложной формы.

Кроме того, весьма низкая доля условно полезной работы  $U_s$  вибрационного грохота на фоне общих энергетических затрат позволяет высказать суждение, что разработка усовершенствованных технологий грохочения с использованием, например, просеивающих поверхностей сложной формы, сопровождающихся более высоким суммарным трением в системе сито – гранулярный материал, не может заметным образом ухудшить общую энергетику процесса грохочения.

Наиболее универсальной моделью, описывающей ВГ сыпучего материала, является модель Вайсберга-Рубисова [43]. Авторы рассматривают толстый слой кускового сыпучего материала, транспортируемого с постоянной скоростью по

просеивающей поверхности.

Ключевым выводом математической модели Вайсберга-Рубисова, описывающей в дифференциальных уравнениях кинетику сухого ВГ, является следующее положение:

$$\frac{d\varepsilon_D}{dy} = \frac{u\varphi}{v} \left(1 - \frac{D}{d_0}\right)^\psi p_{D,y}(0)(1 - \varepsilon_D), \quad (2.7)$$

где  $\varepsilon_D$  – извлечение в подрешетный продукт узкого класса  $D$ ,  $d_0$  – размер отверстия (для щелевидных отверстий – наименьший размер),  $\psi = 1$  для щелевидных отверстий,  $\psi = 2$  для квадратных отверстий,  $\varphi$  – живое сечение сита,  $u$  – нормальная к сити составляющая скорости частиц при их попадании в отверстие,  $v$  – скорость вибрационного транспортирования материала.

Уравнение 2.7 должно быть дополнено очевидным начальным условием  $\varepsilon_0 = \varepsilon|_{y=0}$ .

Функция  $p_{D,y}(x)$  определяется скоростью сегрегационных и диффузионных процессов, происходящих в слое материала при вибрациях. Дать количественное описание этих процессов на основе существующих теоретических моделей не представляется возможным. В то же время очевидно, что эти процессы носят стохастический характер. Наряду с упорядоченным движением каждая частица совершает множество случайных соударений с другими, что влияет на ее местоположение. Кроме того, частицы одного размера  $D$  могут иметь различный средний размер и различную форму, что также определяет статистический характер распределения частиц одного размера по высоте. Следовательно, можно ожидать, что функция  $p_{D,y}(x)$  является нормальным (гауссовским) законом распределения.

Далее авторы отмечают, что Уравнение 2.7 носит общий характер и из него можно вывести уравнение кинетики грохочения, предложенное Ж. Феррарой (G. Ferrara) и У. Прети (U. Preti) [130] для толстого материала, предполагая, что материал в слое идеально перемешан и функция  $k(D)$  определяется как:

$$k(D) = \frac{u\varphi}{vh_0} \left(1 - \frac{D}{d_0}\right)^\psi, \quad (2.8)$$

Тогда

$$\frac{d\varepsilon_D}{dy} = k(D) \frac{1-\varepsilon_D}{1-\gamma}, \quad (2.9)$$

Уравнение кинетики грохочения тонкого слоя также следует из Уравнения 2.7. Так как частицы движутся независимо, понятие толщины слоя теряет смысл, равно как и скорости просеивания, как определяющей приращение этой толщины. При этом распределение материала по крупности в тонком слое сырья, прилегающем к ситам вследствие «скачкообразного» процесса сегрегации, весьма однородно, идеальная сегрегация материала означает, что плотность вероятности обнаружения частицы на сите представляет собой  $\delta$ -функцию Дирака  $p_{D,y}(x) = \delta(\mu)$ . Сохраняет смысл произведение  $up_{D,y}T$ , где  $T$  – период движения материала. Это произведение (ниже обозначено через  $s_0$ ) можно считать константой просеивания. Поскольку скорость транспортирования  $v$  представима в виде  $v = 1/(n_L T)$ , где  $n_L$  – число периодов движения частиц, соответствующих их смещению вдоль сита на единицу длины, Уравнение 2.7 записывается в виде:

$$\frac{d\varepsilon_D}{dy} = s_0 n_L \varphi \left(1 - \frac{D}{d_0}\right)^\psi (1 - \varepsilon_D), \quad (2.10)$$

Уравнение 2.7 можно решать численно. Аналитическое уравнение может быть получено только в некоторых простейших случаях. Наиболее интересным для авторов представляется случай так называемой идеальной сегрегации. Данное предположение об идеальной сегрегации материала основывается на представлении о сегрегации как о скачкообразном процессе, заканчивающемся на начальном участке ситовой поверхности. Допущение об идеальности сегрегации основывается на том факте, что по длине грохота, то есть в зависимости от времени грохочения, средняя крупность монотонно возрастает. Таким образом, для предлагаемой модели извлечение нижнего класса в подрешетный продукт определяется только скоростью движения материала вдоль грохота и пропускной способностью сита.

После внесения Л.А. Вайсбергом и К.С. Ивановым в указанную теорию некоторых уточнений, сделанных для прохождения неизометрических частиц,

основатели теории продемонстрировали, что точность расчетов ЭГ по предложенной модели весьма высокая и достигает 1-1,5 % [38].

Авторами также отмечается, что чем выше однородность материала в слое, находящемся непосредственно над ситом, тем выше вероятность прохождения материала в подрешетный продукт.

Этими же авторами статистически достоверными обследованиями промышленных процессов ВГ в толстом слое различных мелкодробленных рудных материалов с влажностью 3-4 % (несколько сотен опробований) показано, что вертикальная скорость прохождения материала сквозь сито находится преимущественно в узком диапазоне 1,10-1,17 см/с [43]. Это подтверждает разработанные теоретические представления о закономерностях вибрационной классификации сухого гранулярного материала с типовым распределением по крупности, близким к нормальному.

Вследствие высокой точности описания процесса грохочения в рамках ранее разработанной математической модели, представляется, что вопрос совершенствования моделирования можно рассмотреть с другой стороны: как используя имеющиеся представления, параметрически изменить их содержание, чтобы достичь более высоких технологических показателей и обосновать это натурными экспериментами. Поэтому в рамках настоящей работы на базе теории Вайсберга-Рубисова и ее дополнений был рассмотрен следующий подход.

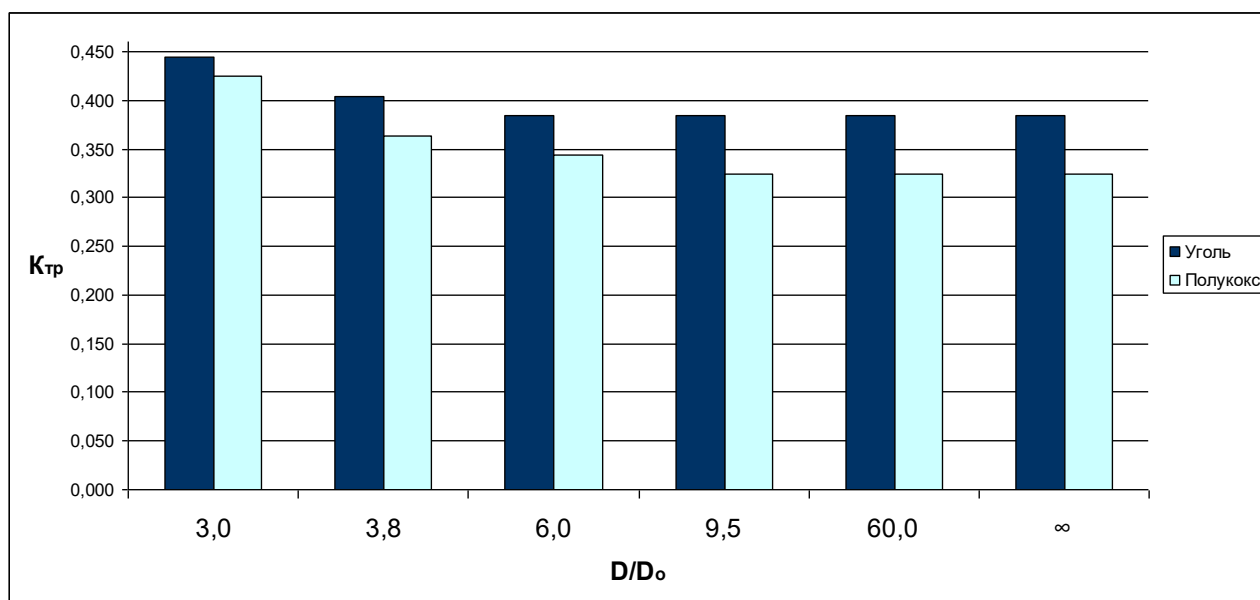
Как ни покажется это несколько парадоксальным, имеется возможность направленно изменить реологические свойства сырья, находящегося на сите грохота, в сторону увеличения его подвижности и однородности по крупности. Это должно увеличить оба ключевых фактора эффективности работы грохота — скорости перемещения материала по ситум и скорости транспортирования материала мелких классов сквозь прилегающий к ситум слой и собственно сито.

С повышением однородности материала над плоским ситом понижается плотность упаковки материала в прилегающем слое (в кгс/м<sup>2</sup>) и увеличивается мера упорядоченности материала в объеме, то есть уменьшатся его энтропия в одном из ее классических пониманий. Энтропию невозможно измерить напрямую, но можно

рассчитать косвенными методами [44; 111]. Заметим, что энтропия при постоянной температуре начала и конца изучаемого процесса имеет ту же размерность, что и весовая плотность упаковки слоя материала над ситом (температура здесь выступает как безразмерный коэффициент). Отметим, что и в том и в другом случае следует использовать именно килограмм силы, а не массы, т.к. любой процесс грохочения протекает в гравитационном поле.

Для подтверждения указанных предположений в лаборатории НПК «Механобр-техника» проведены исследования на примере влияния различных модификаций угля на эффективность его ВГ [17; 19]. Для понимания закономерностей ситовой вибрационной классификации угля были исследованы существенные для процесса грохочения его физические свойства, среди которых отдельный интерес представляет коэффициент внутреннего трения (град.).

Влияние соотношения  $D/D_0$  на коэффициент трения скольжения исходного угля и термически обработанного угля (полукокса), приведено на Рисунке 2.2. Значение  $\infty$  отвечает случаю скольжения пробной частицы по стальной полированной поверхности.



( $K_{тр}$  - коэффициент трения,  $D$  – диаметр частиц,  $D_0$  - диаметр ячейки сита)

Рисунок 2.2 - Зависимость условного коэффициента трения скольжения от соотношения  $D/D_0$  [17]

Из приведенных данных следует, что с увеличением размера частиц угля и

полукокса условный коэффициент трения о поверхность сита уменьшается и при  $D/D_o > 6$  приближается к коэффициенту трения по гладкой стальной поверхности. Таким образом, в процессе грохочения по мере ухода мелких частиц в подрешетный продукт в продукте на сите растет отношение  $D/D_o$  и закономерно происходит некоторое увеличение скорости транспортировки крупных частиц по ситам в сторону разгрузки.

Кроме определения коэффициента внутреннего трения реологические свойства угля и полукокса изучали также путем измерения текучести материала различных классов крупности, а также неклассифицированного материала крупностью  $-2,5+0$  мм. Изучение текучести проводили при  $20\text{ }^\circ\text{C}$  с помощью вискозиметра свободного истечения с прозрачной цилиндрической частью диаметром 65 мм и соплом истечения диаметром 15 мм. Необходимо отметить, что вихревых движений материала в зоне перехода к соплу, приводящих к потере кинетической энергии и искажающих результаты замеров (поправка Хагенбаха), не наблюдалось. Эффективную вязкость сыпучего материала определяли, как отношение времени истечения исследуемого материала к времени истечения воды того же объема (градусы Энглера,  $^\circ\text{E}$ ). Измеренная эффективная вязкость не является константой, однако позволяет оценить тенденцию изменения реологических свойств сыпучего в зависимости от его физического состояния. Характерно, что из-за пристенного эффекта провести замеры эффективной вязкости материала крупнее 2,5 мм на том же вискозиметре не представляется возможным. Установлено, что эффективная вязкость узких фракций крупности угля и полукокса близка к вязкости воды (Рисунки 2.3 и 2.4). Также было обнаружено, что из-за образования свода в цилиндрической части вискозиметра невозможно обеспечить свободное истечение неклассифицированного угля фракции  $-2,5+0$  мм и тонкой фракции  $-0,315+0$  мм. По той же причине отсутствует свободное истечение неклассифицированного полукокса крупностью  $-2,5+0$  мм. Поэтому для получения сравнительных данных был использован известный в физической химии вязких систем прием вибрационной инициации истечения. Инициацию обеспечивали путем наложения на вискозиметр вибрации с частотой

50 Гц и амплитудой 0,2 мм. Из результатов измерений следует, что эффективная вязкость неклассифицированного материала в четыре-пять раз превышает вязкость узких фракций крупности. В целом эффективная вязкость сыпучего полукокса ниже вязкости исходного сыпучего угля. Последнее вполне согласуется с меньшими значениями коэффициентов трения скольжения и внутреннего трения полукокса по сравнению с исходным углем.

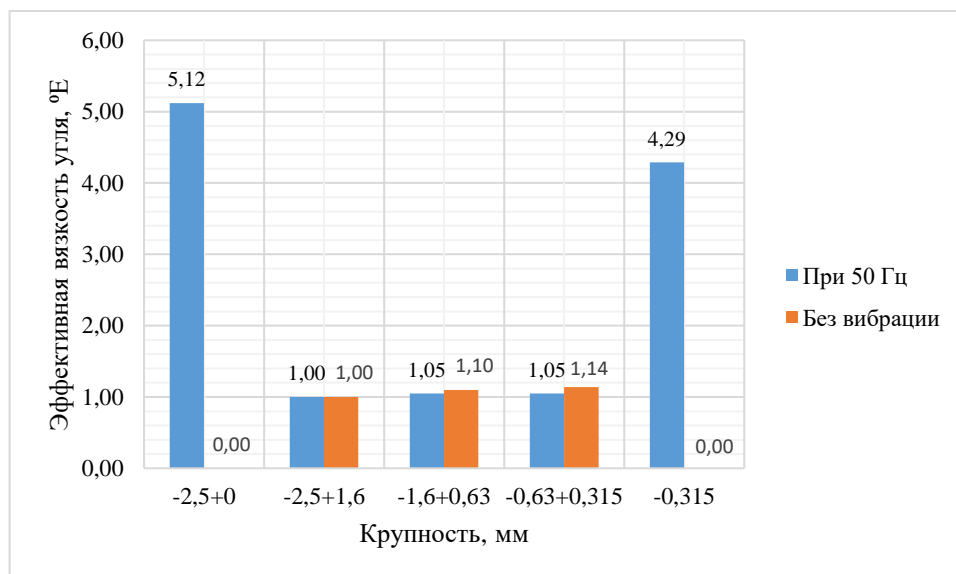


Рисунок 2.3 - Эффективная вязкость (°E) различных фракций крупности каменного угля с виброинициацией и без нее [17]

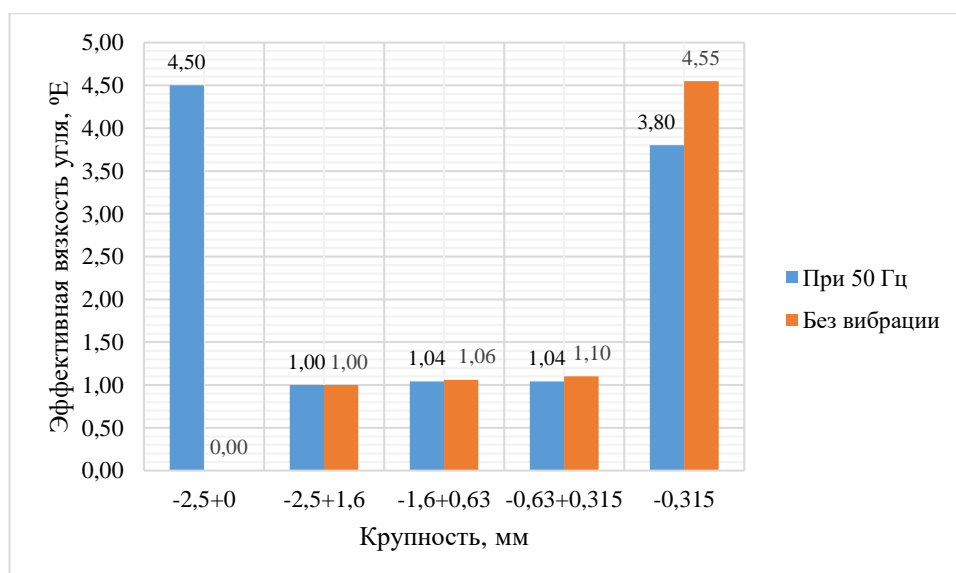


Рисунок 2.4 - Эффективная вязкость (°E) различных фракций крупности полукокса с виброинициацией и без нее [17]

Исходя из вышеизложенного, была выявлена закономерность уменьшения

коэффициента эффективной вязкости сыпучего материала при упорядочивании гранулометрического состава (увеличение степени его однородности или, что то же самое, уменьшения его энтропии) как при свободном истечении, так и при вибрационной инициации. Данное обстоятельство очевидным образом способствует скорости прохождения гранулярного материала сквозь сито.

Таким образом, формируется предположение, что если направленно упорядочить гранулометрический состав классифицируемого материала, то можно повысить эффективность его вибрационного разделения по крупности. Практически для этого следует, например, предварительно отсеять некоторое количество мелкой фракции, то есть осуществить грохочение «от мелкого класса к крупному».

#### **2.4 Эффективность предварительного отсева мелких классов при вибрационном грохочении**

По-видимому, одно из первых описаний многоситных вибрационных грохотов приведено во втором издании справочника по обогащению руд проф. А. Таггарта [145]. В справочнике, судя по приведенному в нем чертежу, подразумевается, что грохочение проводят от крупного класса к мелкому. До настоящего времени в горной, строительной и абразивной промышленности для одновременного получения материала нескольких классов крупности используются многоситные грохоты, в которых выделение продуктов осуществляется только от крупного класса к мелкому.

Вероятно, первое системное описание технологии ВГ на многоситных грохотах в варианте от мелкого класса к крупному или комбинированного варианта грохочения от мелкого класса к крупному с дополнительной защитной решеткой, приведено в монографии сотрудника института Механобр и Ленинградского горного института проф. К.К. Лиандова в 1948 г. [74]. В его книге пониженное пылеобразование усматривается как единственное достоинство такого процесса, а также указывается на основной недостаток – усиленный износ верхнего тонкого сита.



Несколько позднее задача классификации по крупности от мелкого класса к крупному на последовательно расположенных ситах была более подробно рассмотрена в учебнике [6]. При такой последовательности выделения материала для перегрузки надрешетных продуктов на следующее сито требуется каскадное расположение просеивающих поверхностей, либо возможно использование одной просеивающей поверхности, составленной из нескольких карт с повышающимися в сторону разгрузки размерами ячеек. В числе достоинств процесса грохочения от мелкого класса к крупному авторы указывают на пониженное образование мелких классов при истирании хрупких полезных ископаемых и несколько сомнительное удобство наблюдения за процессом. В книге также убедительно отмечены эксплуатационные недостатки процесса, в первую очередь, быстрый износ первого тонкого сита. С учетом очевидных недостатков такого процесса, в фундаментальном Справочнике по обогащению руд [107] вопрос о предварительном выделении мелких классов крупности при грохочении даже не обсуждается. Только существенно позднее эта возможность нашла отражение в работах, выполненных под руководством Л.А. Вайсберга [40; 43]. Однако во всех упомянутых работах не рассматривается влияние предварительного ведения тонких фракций крупности на эффективность ВГ.

За последние годы выполнены обширные исследования в области прикладной механики гранулярных материалов [39; 91; 136-137; 142; 144], в том числе работы по изучению сегрегации и реологических свойств полидисперсных сыпучих материалов. Эти работы позволяют предположить, что предварительное выделение тонких классов может способствовать повышению эффективности ВГ в результате направленного изменения физических свойств массива сыпучего материала.

Прямые эксперименты показали, что такой принцип грохочения «от мелкого класса к крупному» реализуем. Повышается и скорость классификации, и суммарная эффективность классификации.

## **2.5 Усовершенствованная технология, обеспечивающая повышение эффективности грохочения за счет одновременного бокового выделения мелких классов**

После первого описания в научно-технической литературе конструкций вибрационных грохотов, оснащенных несколькими плоскими ситами [73], спустя четверть века появились сведения о технологии ВГ на многоситных грохотах в варианте от мелкого класса к крупному [74]. Достоинства такой последовательности усматривались только в пониженном пылеобразовании и в меньшем истирании хрупких полезных ископаемых, а также обозначался основной эксплуатационный недостаток – повышенный износ тонкого сита [6].

Выполненные за последние годы исследования в области нелинейной механики гранулярных материалов [27; 29; 36; 39; 43; 50; 91; 133; 136-137; 142; 144] позволили предположить, что предварительное выделение тонких классов может способствовать повышению эффективности ВГ в результате направленного изменения физических свойств массива сыпучего материала. Выполнен ряд лабораторных исследований, демонстрирующих изменение таких реологических свойств сыпучих материалов, как эффективная вязкость и коэффициент внутреннего трения, в сторону их уменьшения при удалении тонкой фракции из полидисперсного сырья. Результаты лабораторных опытов ситовой классификации показали, что последовательная вибрационная классификация от мелкого класса к крупному позволяет заметно повысить общую эффективность классификации [12; 124; 125].

Избежать конструктивных и эксплуатационных недостатков при грохочении сыпучих материалов от мелкого класса к крупному возможно путем организации «градиентной» классификации на ситах трапецеидальной формы, у которых, как частный случай, боковые просеивающие поверхности имеют несколько меньший размер ячеек, чем донная часть сита. Более того, анализ ранее выполненных работ по теории ситовой вибрационной классификации [43; 91] позволяет предположить, что указанного эффекта преимущественного выделения более тонкой фракции

через наклонные просеивающие поверхности трапецеидального сита можно добиться даже при одинаковом размере просеивающих ячеек боковых и донных поверхностей за счет меньшей вероятности прохождения через наклонные участки сита частиц, близких по размеру к граничной крупности. Такое решение несомненно является более технологичным при изготовлении просеивающей поверхности сложного профиля.

На сегодняшний день возможности увеличения производительности вибрационных грохотов за счет увеличения геометрических размеров их коробов практически исчерпаны, что связано с пределом их механической надежности. Также исчерпаны возможности повышения производительности грохотов за счет увеличения частоты их колебаний.

Относительно низкая эффективность разделения по крупности на грохотах с плоскими ситами особенно часто наблюдается при высоких удельных нагрузках поступающего на сито сырья, и особенно при грохочении сравнительно легкого материала, например, каменного угля. В указанных случаях грохочение вынужденно проходит в толстом слое разделяемого материала и при этом, очевидно, что мелкая фракция материала, подлежащая проходу в нижний (подрешетный) продукт, должна предварительно пройти через слой более крупных частиц, то есть пройти стадию вертикальной вибрационной сегрегации. Это естественным образом понижает скорость и эффективность разделения материала на грохоте.

Существует техническое противоречие: надежные и относительно простые вибрационные грохоты с плоским ситом в силу специфики конструкции не способны просеивать материалы, насыпаемые толстым слоем, а потому обладают относительно низкой производительностью, принятой на единицу занимаемой площади. С другой стороны, вибрационные грохоты с вертикальной осью симметрии лишены этого недостатка, но они имеют существенно более сложную конструкцию [86]. При этом, и те, и другие не обладают достаточно высокой ЭГ.

Для реализации технологии «градиентного» грохочения необходимо создание грохота со сложной просеивающей поверхностью. В основу изобретения

поставлена задача расширения арсенала средств и создание новой и относительно несложной технологии и, соответственно, конструкции вибрационного грохота, обладающего повышенной производительностью грохочения, принятой на единицу площади сита. Достижимый технический результат - повышение ЭГ [87; 90].

### **Выводы по второй главе**

1. Впервые выполнена энергетическая оценка процесса вибрационной классификации сыпучего сырья по крупности. Так называемая «полезная» работа ВГ сравнительно невелика и составляет первые проценты от общих затрат энергии на работу грохота. Показано, что в системе «грохот - разделяемое полидисперсное сырье» в гравитационном поле происходит не диссипативная энергетическая потеря, не противоречащая Второму началу термодинамики. С помощью приведенного энергетического подхода, в принципе, можно описать процесс сегрегации полидисперсного сырья под действием вибрации, в котором роль просеивающей поверхности выполняют крупные частицы разделяемого материала.

2. Данные о реологии легких сыпучих (гранулярных) материалов, например, углей служат основой для создания новой высокоэффективной технологии грохочения.

3. Учитывая известные технические и эксплуатационные сложности прямого последовательного грохочения «от мелкого класса к крупному» и наличие теоретического задела по механизму вибрационной сегрегации гранулярного материала, предложена новая технология грохочения сыпучего материала на ситах трапециевидной формы.

## **ГЛАВА 3 МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ, ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ**

### **3.1 Минералогический состав сырья**

В качестве минеральных объектов исследований были выбраны сыпучие материалы с существенно различными физическими свойствами – два типа рудного сырья и каменный уголь:

1. Апатитовая руда Ошурковского месторождения была представлена преимущественно силикатной вмещающей породой и содержала 10-12 % рудных минералов (характеризующаяся такими основными минералами, как полевой шпат, биотит, апатит и др.).

2. Медно-никелевая руда месторождения Печенга была представлена силикатной вмещающей породой с 7-9 % сульфидных минералов (типичный представитель ультраосновных руд цветных металлов, основной минеральный комплекс хлорит-оливин-талък-пентландит).

3. Длиннопламенный уголь Кузбасса Караканского угольного месторождения. Проба кузбасского энергетического угля имела зольность 15 %.

Исходное сырье представляло собой мелкодробленые продукты крупностью – 20 мм с близкой гранулометрической характеристикой. Все дробленые образцы были представлены преимущественно минеральными агрегатами с тонко- и средневкрапленной структурой, а не отдельными минералами, поэтому, с позиции настоящей работы, их можно считать достаточно однородными минеральными объектами. Вещественный состав испытанных проб руды и угля соответствовал типичному составу соответствующего сырья.

Указанные образцы были отобраны и усреднены по методу кольца и конуса на складе НПК «Механобр-техника».

## АПАТИТОВЫЕ РУДЫ ОШУРКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ошурковский апатитоносный массив расположен в Иволгинском районе Бурятии в низовьях р. Селенга, в 10 км к северо-западу от г. Улан-Удэ. К Ошурковскому массиву приурочено одноименное апатитовое месторождение. Вмещающие породы месторождения изучены А.Е. Ферсманом еще в 1915 г. Основные породообразующие минералы представлены плагиоклазом, полевым шпатом, роговой обманкой, пироксеном, биотитом. Акцессорные (в непромышленных количествах) – титанит, титаномагнетит, циркон.

Балансовые запасы руды на месторождении составляют 2,8 млрд т, окиси фосфора – 108,5 млн т при среднем содержании 3,8 %. Для руд данного месторождения предполагалось использование классической схемы трехстадиального дробления в замкнутом цикле с дальнейшей классификацией по крупности. Ошурковское месторождение находится в особой экологической безводной зоне. Объект временно отнесен к категории не распределенных.

## МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЕЧЕНГА

Основу цветной металлургии Мурманской обл. составляет одно из крупнейших месторождений медно-никелевых руд – Печенгское. Печенгский рудный район расположен на северо-западной части Кольского полуострова.

Медно-никелевые месторождения в Печенгском р-не сосредоточены в трех рудных полях: Печенгском, Аллареченском и Северо-Восточном.

Месторождения всех трех рудных полей связаны с массивами ультраосновных пород, имеют одинаковый минеральный состав в части главных рудообразующих минералов, но несколько различаются по геологическим условиям залегания.

Основные породообразующие минералы представлены серпентином, пироксеном, оливином, хлоритом, тальком, биотитом. Главными рудными минералами являются пентландит, халькопирит, пирротин, халькопирит.

## КАМЕННЫЙ УГОЛЬ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

Кузнецкий угольный бассейн широко разрабатывается с 1920-х гг. По запасам и качеству углей Кузбасс – один из крупнейших эксплуатируемых каменноугольных бассейнов мира, где на сравнительно небольшой территории сконцентрированы мощные угольные залежи с широкой гаммой углей, пригодных для коксования, получения жидкого топлива и сырья для химической промышленности.

Большая часть всех запасов приходится на ценные коксующиеся угли. На их долю приходится 40 % всей добычи. Площадь бассейна около 26 тыс. км<sup>2</sup>. Балансовые запасы его составляют 600 млрд т, мощность пластов от 6-14 м, а в ряде мест достигает 20-25 м, средняя глубина разработки угольных пластов шахтным методом достигает 315 м. Бассейн имеет благоприятные горно-геологические условия разработки, что обеспечивает их низкую себестоимость.

Качество угля разнообразно, однако большую часть специалисты относят к числу высококачественных. В глубоких горизонтах их состав становится средним по качеству:

- содержание влаги: 5-15 %;
- примесь золы: 4-16 %;
- примесь серы: 0,4-0,6 %.

В настоящей работе рассматривается уголь марки Д Караканского угольного месторождения. Караканский угольный разрез расположен в северо-восточной части Ерунаковского геолого-экономического района Кузбасса в 35 км от г. Белово [67; 77-78].

### **3.2 Физические свойства минерального сырья, влияющие на показатели грохочения**

Выполнен цикл исследований физических свойств различных сыпучих материалов. Для проведения исследования были выбраны значимые физические свойства образцов. К таким свойствам (параметрам) образцов полезных ископаемых относятся удельная масса образцов, насыпная плотность,

гранулометрическая характеристика, внутренний угол трения образцов (угол естественного откоса).

Основным оборудованием, на котором проводилось изучение физико-механических свойств сырья, являлись: ситовой анализатор, оптический угломер, пикнометр, весы электронные лабораторные (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Перечень средств проведения испытаний

Наименование, тип и марка	К-во, шт.	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Угломер	1	ГОСТ 5378-88 [61]	Класс точности II, цена деления 1 град.
Штангенциркуль	1	ГОСТ 166-89 [53]	Класс точности II
Линейка измерительная металлическая	1	ГОСТ 427-75 [60]	Цена деления 1 мм, диапазон 1-1000 мм
Пикнометр ПТ-100	1	ГОСТ 22524-77 [55]	Погрешность 0,1 %
Весы лабораторные электронные ВЛТЭ-150	1	ГОСТ 24104-2001 [57]	Класс точности II, цена деления 0,001 г
Весы электронные напольные РВ-60	1	ГОСТ 24104-2001 [57]	Класс точности II, цена деления 0,01 кг

Коэффициент трения скольжения определялся путем замера угла начального движения по наклонной плоскости реальных образцов. Материал поверхности идентичен материалу просеивающей поверхности грохота. Коэффициент трения рассчитывается путем перевода экспериментально определенных углов наклона плоскости в градусах в тангенс этого угла.

Угол внутреннего трения, идентичный углу естественного откоса, определялся путем непосредственного замера конуса испытуемого сыпучего материала. Для данной цели сконструировано и изготовлено усовершенствованное устройство (прибор) для измерения углов естественного откоса сыпучих материалов [88]. Предложенное устройство отличается высокой точностью измерения углов естественного откоса сыпучих материалов для дальнейшего расчета коэффициента внутреннего трения полидисперсного сырья – важного параметра, используемого в моделях, описывающих процессы вибрационной сегрегации и классификации по крупности.



Определение гранулометрического состава проводилось ситовым методом по действующему стандарту – ГОСТ 12536-2014 [52]. Испытательный прибор – анализатор ситовой вибрационный АСВ-200.

Определение удельной плотности образцов и их насыпного веса проводилось пикнометрическим методом в соответствии с Ведомственным стандартом ВСН 55-69 «Инструкция по определению плотности грунтов» [47].

Испытания проводились в цехе стендовых установок и в специализированной лаборатории вибрационной механики на площадке НПК «Механобр-техника».

В Таблице 3.2 приведены физические свойства объектов. Необходимо отметить сильное различие физических свойств руд и угля. Как видно, уголь отличается низкой насыпной плотностью и высоким коэффициентом сцепления (внутреннего трения).

Таблица 3.2 - Физические свойства минеральных объектов

Наименование параметров	Апатитовая руда	Медно-никелевая руда	Уголь
Плотность в куске, кг 10 <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	3,22	3,28	1,10
Насыпная плотность, кг 10 <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	1,78	1,88	0,76
Угол естественного откоса, град.	43	38	44
Условный коэффициент внутреннего трения	0,93	0,78	0,97

Как известно, ВГ – «узкое» место в цепочке обогащения легких полезных ископаемых. Грохочение природных углей вынужденно проводится в относительно толстом слое из-за низкого насыпного веса исходного материала, что приводит к низкой эффективности классификации. В процессе грохочения относительно «толстый слой» образуется при подаче материала на ситовую поверхность грохота. Так, при грохочении угля он занимает около 1/3 длины ситовой поверхности, в то время как у рудных материалов – около 1/6 длины (Рисунок 3.1).

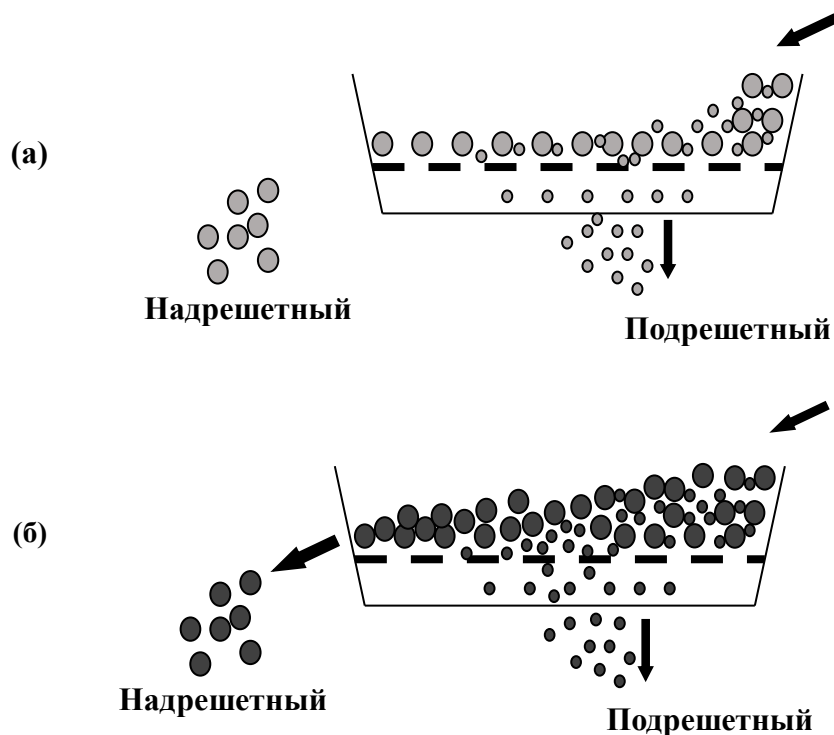


Рисунок 3.1 - Особенности грохочения рудных материалов (а) и угля (б)

Стоит отметить, что уголь имеет различные физические свойства до и после термообработки. Так в работе [10] авторами рассматривается изменение физико-механических свойств угля после воздействия термообработки (Рисунок 3.2).

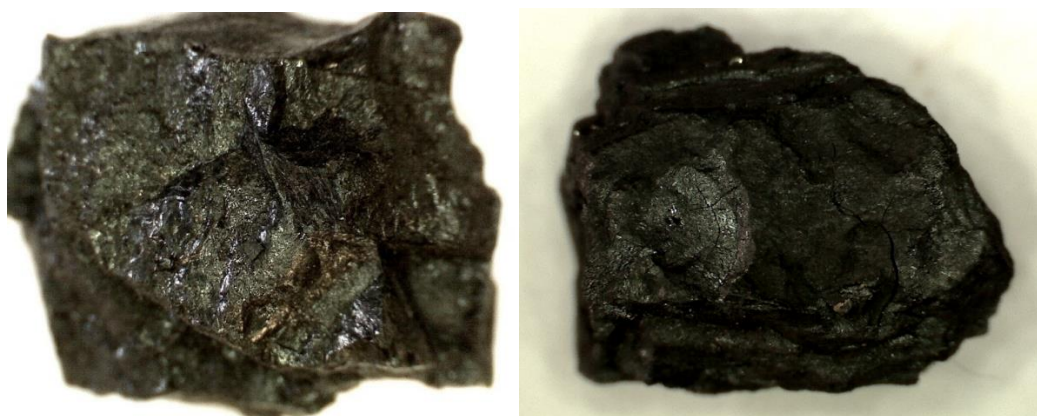


Рисунок 3.2 - Внешний вид исходного угля (слева) и полукокса (справа)

Например, в результате термообработки значительно снижается значение кажущейся плотности (Таблица 3.3). Снижение значений других указанных свойств не считается драматичным, но тем не менее заметным.

Таблица 3.3 - Физические свойства минеральных объектов

Свойства	Образцы	Исходный уголь	Полукокс
Кажущаяся плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>		1,18	0,95
Условный коэффициент трения скольжения		0,38	0,34
Коэффициент внутреннего трения		0,97	0,90
Насыпная плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>		0,76	0,74

Также довольно интересным являлось изучение рельефной структуры, т.е. шероховатости поверхности угля и её измерение при термообработке [17]. Применительно к процессам вибрационного перемещения и классификации сырья крупностью от долей миллиметра до 10-20 мм наиболее перспективным представляется исследование рельефа поверхности на микронном и субмикронном уровнях. В рамках вышеуказанной работы шероховатость поверхности количественно оценивали с использованием лазерного сканирующего 3D-микроскопа Keyence VK-x200. Устройство позволяет получить протокол измерений шероховатости поверхности по многим параметрам, которые используются в международной практике оценки свойств поверхностей различных веществ (например, металла, дерева, камня), подвергнутых механической обработке.

С позиции применимости измерений шероховатости каменного материала к технологиям сепарации представляют интерес два основных интегральных параметра – Ra и Rz. Ra – среднее арифметическое абсолютных значений (значений по модулю) отклонений профиля в пределах базовой длины, мкм; Rz – сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов профиля в пределах базовой длины, мкм. Измеренные параметры Ra и Rz для преобладающей витреновой фазы угля составили 42,0 и 288,7 мкм, а для полукокса — соответственно 39,2 и 273,3 мкм. Таким образом, шероховатость полукокса после термообработки по указанным критериям на 5-7 % ниже, чем у исходного угля. Визуальная оценка рельефа поверхности образцов лазерных отображений и их 3D-моделей (Рисунки 3.3 и 3.4)

демонстрирует другой интересный факт: шероховатость поверхности исходного угля связана в основном с остроконечными выступами микронного размера, а шероховатость термически модифицированного при 550 °С угля в значительной степени связана с лунками. Кроме того, полукокс имеет выраженную поверхностную битуминизацию.

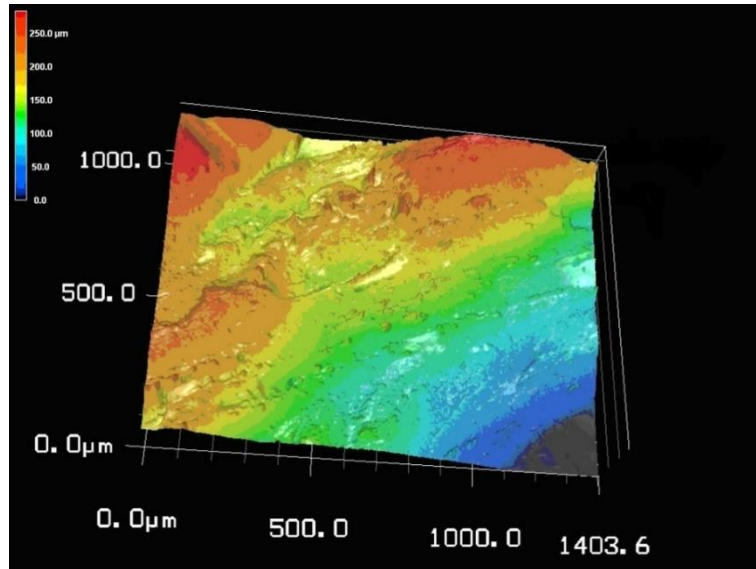


Рисунок 3.3 - 3D-модель лазерного сканирования поверхности угля [17]

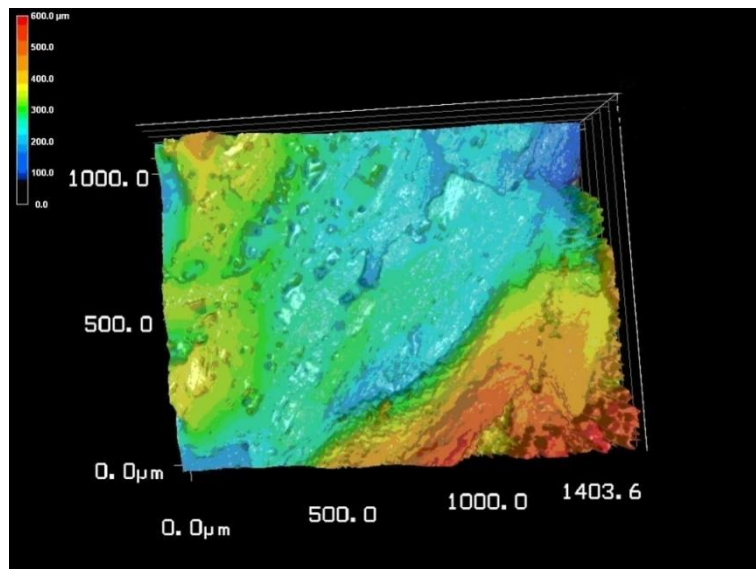


Рисунок 3.4 - 3D-модель лазерного сканирования поверхности полукокса [17]

### **Выводы по третьей главе**

1 Определены основные значимые физические свойства сыпучего материала, подлежащего грохочению (классификации по крупности), в зависимости от гранулометрического состава смеси.

2 Исследования проведены на различном сырье – двух типах руд (апатитовая и медно-никелевая) и каменном угле, имеющем существенные различия в физических свойствах и оказывающем значительное влияние на процесс грохочения.

3 Установлено, что уголь имеет низкую насыпную плотность и высокий коэффициент сцепления (внутреннего трения) по сравнению с рудами, что должно быть принято во внимание при усовершенствовании технологии грохочения легких полезных ископаемых.

## ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГРОХОЧЕНИЯ

### 4.1 Технологические параметры и особенности аппаратов для проведения исследований

В главах 4.2, 4.3 и 4.4 испытания проводили на трех типах полупромышленных грохотов в непрерывном режиме – на грохотах с прямоугольными ситами площадью 0,5 м<sup>2</sup> с орбитальным движением деки в вертикальной плоскости (ГИЛ-051) и прямолинейными колебаниями (ГСЛ-051), а также на круглом грохоте с орбитальными колебаниями в горизонтальной плоскости (Гр-5) и ситом диаметром 0,5 м. Все грохоты были с регулируемой частотой привода. Угол наклона сита грохота ГИЛ-051 составлял 17°, ситовая поверхность грохота ГСЛ-051 имела наклон в сторону разгрузки 2°, то есть была практически горизонтальной. Все испытанные типы грохотов имели полную амплитуду колебаний 4 мм. [11].

Грохочение проводили при удельной нагрузке 0,52-0,55 т/м<sup>2</sup>, просеивающая поверхность была во всех случаях идентичной – с квадратными ячейками со стороной 1,6 мм. [13]. При такой удельной нагрузке грохочение рудного сырья протекало практически в монослое (за исключением зоны загрузки материала), а грохочение угля на значительной части ситовой поверхности протекало условно в «толстом» слое, то есть в слое толщиной свыше двух средних размеров частиц [14; 35].

В главе 4.5 опыты проводили на вибрационном анализаторе с орбитальными колебаниями в горизонтальной плоскости, оснащенном ситами диаметром 200 мм с квадратными отверстиями. Частота колебаний сит составляла 16,7 с<sup>-1</sup>. Первоначальная масса загружаемой пробы угля составляла 400 г, что обеспечивало образование толстого слоя материала на сите. Вибрационную классификацию материала проводили в периодическом режиме на сите с отверстиями 2,5 мм, а также последовательно на ситах с ячейками 2,0 и 2,5 мм. В опытах с последовательной классификацией сначала материал рассеивали с фиксированным

временем на сите с отверстиями 2,0 мм, определяли выход фракций, а затем надрешетный продукт классифицировали на сите с отверстиями 2,5 мм с тем же временем, что и опыт на сите 2,0 мм. В интервальных опытах определяли кинетику процесса классификации. Таким образом, опыты имитировали непрерывный процесс последовательного грохочения.

В главе 4.6 сравнительные исследования проводились на двух различных просеивающих поверхностях: плоской стальной с круглыми ячейками диаметром 4 мм и трапецеидальной стальной с круглыми ячейками диаметром 4 мм, общая площадь просеивающей поверхности: 0,143 м<sup>2</sup>. Параметры грохочения: угол наклона короба грохота 17 град., амплитуда колебаний 3 мм, частота 16,7 с<sup>-1</sup>, виброускорение 33,0 м/с<sup>2</sup> или 3,4G. Дозирование осуществлялось с помощью вибрационного питателя. Контроль загрузки питания проводился по медиане трапецеидального сита в центральной части обеих просеивающих поверхностей по длине для идентичности геометрии надрешетного слоя материала.

#### 4.2 Вибрационная инерционная установка с круговой траекторией колебаний в вертикальной плоскости



Рисунок 4.1 - Полупромышленный вибрационный грохот ГИЛ-051

Таблица 4.1 - Технические характеристики ГИЛ-051

Наименование	Значение
Производительность по питанию (в зависимости от крупности разделения), т/ч	0,02-4
Крупность разделения, мм	0,1-15
Количество сит, шт.	1
Угол наклона, град.	10...25

Продолжение таблицы 4.1

Амплитуда колебаний, мм	3...5
Частота колебаний, Гц	16
Мощность привода, кВт	0,55
Масса, кг	182
Размеры просеивающей поверхности, мм	
длина	1034
ширина	500
Габаритные размеры (при угле 20°), мм	
длина	1023
ширина	1060
высота	676

В процессе ВГ на ситовой поверхности в результате прохождения мелких частиц в подрешетный продукт происходит непрерывное изменение гранулометрической характеристики надрешетного продукта по мере его продвижения по ситовой поверхности.

Выполненные технологические испытания состоят из двух блоков – замеров ключевых физико-механических свойств рудных образцов в процессе изменения (закрупнения) гранулометрического состава и собственно исследования процесса ВГ при варьировании частоты вибрации короба грохота для трёх грохотов с разным типом движения короба. Результаты замеров физических свойств исходных образцов приведены в главе 3.2. Экспериментальному изучению подвергнута частота колебаний как доминирующий параметр ВГ [15; 18].

Объектом испытаний является сыпучий материал, подлежащий классификации по крупности, и действующие образцы полупромышленных вибрационных ситовых грохотов ГИЛ-051, ГСЛ-051 и Гр-5.

Определение пределов регулирования частоты колебаний короба грохота-сепаратора проводилось с применением измерительного прибора «Вибротест МГ4». Оборудование, используемое для проведения испытаний, представлено в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Перечень средств проведения испытаний

Наименование, тип и марка	К-во, шт.	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Угломер	1	ГОСТ 5378-88 [61]	Класс точности II, цена деления 1 град.



Продолжение таблицы 4.2

Виброметр	1	Вибротест МГ4	Предел измерений частоты 2-100 Гц, вибрации 0,2 Гц, амплитуды 0,01-20 мм, погрешность 5 %
Линейка измерительная металлическая	1	ГОСТ 427-75 [60]	Цена деления 1 мм, диапазон 1-1000 мм
Весы лабораторные электронные ВЛТЭ-150	1	ГОСТ 24104-2001 [57]	Класс точности II, цена деления 0,001 г
Весы электронные настольные РВ-60	1	ГОСТ 24104-2001 [57]	Класс точности II, цена деления 0,01 кг
Стробоскоп	1	CDA 9452	100:1000, 1000:10000 вспышек/мин
Анализатор ситовой АСВ-200 и АВС-300	2	ГОСТ 12536-2014 [52]	Число сит – до 6 Точность измерений 0,3 %
Анализатор качества электроэнергии АКЭ-824	1	ГОСТ 32144-2013 [58]	Погрешность 0,05 %

ЭГ по заданным классам крупности (в процентах) рассчитывалась по классической методике.

В Таблице 4.3 представлена гранулометрическая характеристика испытуемого материала.

Таблица 4.3 - Гранулометрическая характеристика экспериментальных проб руд и угля

Классы крупности, мм	Содержание классов крупности, %		
	Апатитовая руда	Медно-никелевая руда	Уголь
+20	2,0	-	1,6
-20+10	21,9	9,3	33,7
-10+5	24,2	45,3	24,1
-5+2,5	13,2	12,0	11,8
-2,5+1,4	6,1	6,2	6,4
-1,4+0,63	12,2	10,5	11,5
-0,63+0,315	8,8	6,6	7,3
-0,315	11,6	10,1	3,6
Всего	100,0	100,0	100,0

### Примеры таблиц расчета основных технологических показателей

В качестве примера расчета основных технологических показателей использованы данные для медно-никелевой руды на грохоте ГИЛ-051 с частотой вращения ротора 40 Гц (Таблица 4.4), 50 Гц (Таблица 4.5) и 60 Гц (Таблица 4.6).

Используемые обозначения:

А – содержание классов в исходной пробе;

а – содержание классов в исходном ниже границы разделения;

Г – выход подрешетного продукта;

Е – эффективность разделения (извлечение) по границе разделения;

в – содержание классов в подрешетном продукте;

е – частные извлечения (эффективность) отдельных классов.

Таблица 4.4 - Технологические показатели медно-никелевой руды, 40 Гц

Классы крупности, мм	Исходная проба		а подрш.	Г, % подрш.	Оценка эффективности грохочения			
	% исх.	А в исх., %			Е, % подрш.	в, % подрш.	Г*в	е, класса %
+5	52,2							
-5+2,5	18,1							
-2,5+1,4	2,0							
-1,4+0,63	9,2							
-0,63+0,315	4,9	4,9	26,5			20,9	351	71,7
-0,315	13,6	13,6	73,5			79,1	1329	97,7
Итого:	100,0	18,5	100,0	16,8	90,8	100,0	1680	

Таблица 4.5 - Технологические показатели медно-никелевой руды, 50 Гц

Классы крупности, мм	Исходная проба		а подрш.	Г, % подрш.	Оценка эффективности грохочения			
	% исх.	А в исх., %			Е, % подрш.	в, % подрш.	Г*в	е, класса %
+5	52,2							
-5+2,5	18,1							
-2,5+1,4	2,0							
-1,4+0,63	9,2							
-0,63+0,315	4,9	4,9	26,5			21,2	341	69,7
-0,315	13,6	13,6	73,5			78,8	1269	93,3
Итого:	100,0	18,5	100,0	16,1	87,0	100,0	1610	

Таблица 4.6 - Технологические показатели медно-никелевой руды, 60 Гц

Классы крупности, мм	Исходная проба		а подрш.	Г, % подрш.	Оценка эффективности грохочения			
	% исх.	А в исх., %			Е, % подрш.	в, % подрш.	Г*в	е, класса %
+5	52,2							
-5+2,5	18,1							
-2,5+1,4	2,0							
-1,4+0,63	9,2							
-0,63+0,315	4,9	4,9	26,5			21,3	326	66,5
-0,315	13,6	13,6	73,5			78,7	1204	88,5
Итого:	100,0	18,5	100,0	15,3	82,7	100,0	1530	

В ходе проведения экспериментов была осуществлена видеосъемка распределения частиц при процессе грохочения на инерционном и самобалансном грохотах. Ниже приведены снимки из полученной видеозаписи (Рисунки 4.2-4.5; 4.7-4.10).

#### Снимки эксперимента на инерционном грохоте



Рисунок 4.2 - Распределение частиц ГИЛ-051  
(10 сек. съемки)



Рисунок 4.3 - Распределение частиц ГИЛ-051  
(20 сек. съемки)

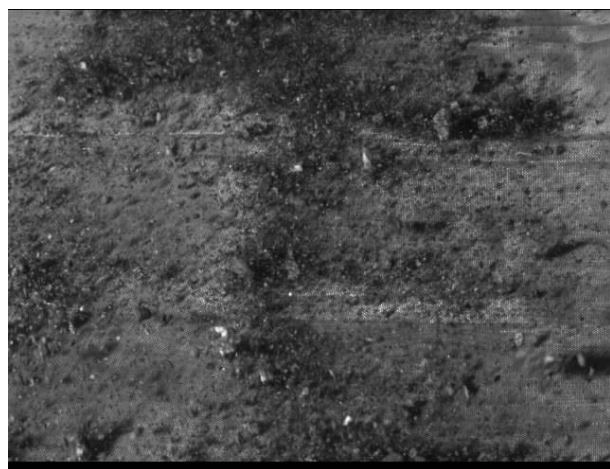


Рисунок 4.4 - Распределение частиц ГИЛ-051  
(30 сек. съемки)



Рисунок 4.5 - Распределение частиц ГИЛ-051  
(40 сек. съемки)

### 4.3 Вибрационная установка с прямолинейной траекторией колебаний



Рисунок 4.6 - Полупромышленный вибрационный грохот ГСЛ-051

Таблица 4.7 - Технические характеристики ГСЛ-051

Наименование	Значение
Производительность по питанию, т/ч	до 6
Крупность разделения, мм	0,1-25
Количество сит, шт.	1
Угол наклона, град.	0-5
Амплитуда колебаний, мм	3-5
Частота колебаний, Гц	16
Мощность привода, кВт	2x0,375
Масса, кг	260
Размеры просеивающей поверхности, мм	
длина	1000
ширина	500
Габаритные размеры, мм	
длина	1100
ширина	1050
высота	720

**Снимки эксперимента на самобалансном грохоте**

Рисунок 4.7 - Распределение частиц ГСЛ-051  
(10 сек. съемки)



Рисунок 4.8 - Распределение частиц ГСЛ-051  
(20 сек. съемки)



Рисунок 4.9 - Распределение частиц  
ГСЛ-051 (30 сек. съемки)

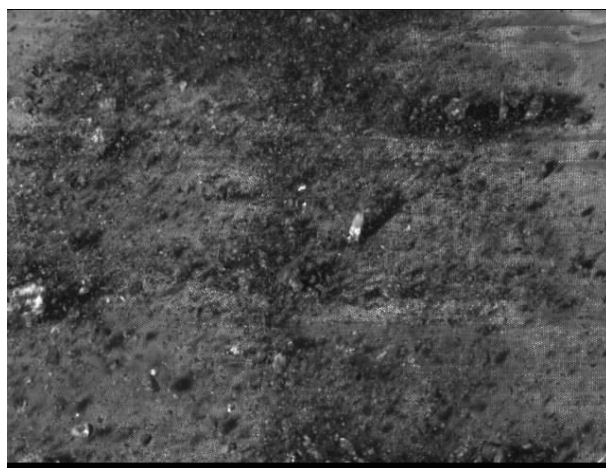


Рисунок 4.10 - Распределение частиц  
ГСЛ-051 (40 сек. съемки)

**4.4 Вибрационная инерционная установка с круговой траекторией колебаний в горизонтальной плоскости**

Рисунок 4.12 - Полупромышленный круглый грохот Гр-5 [105]

Таблица 4.8 - Технические характеристики Гр-5

Наименование	Значение
Крупность исходного материала, мм, не более	20
Количество просеивающих элементов, шт., не более	5
Диаметр просеивающих элементов, мм	500
Мощность электродвигателей, кВт	2 x 0,37
Производительность, кг/ч (в зависимости от крупности разделения)	50-250
Масса, кг	120
Габаритные размеры, мм	
длина	770
ширина	694
высота	1030

Сравнительная ЭГ по классу -1,6 мм приведена в Таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Эффективность грохочения апатитовой и медно-никелевой руды и каменного угля на грохотах с различной траекторией вибрационных воздействий

Тип сырья	Частота, Гц		Эффективность, %		
			Тип грохота		
	ротора	колебаний короба	ГИЛ-051	ГСЛ-051	Гр-5
Апатитовая руда	40,0	13,3	89,0	92,2	81,6
	50,0	16,7	85,6	89,4	81,5
	60,0	20,0	83,0	86,2	80,1
Медно- никелевая руда	40,0	13,3	90,8	92,7	82,0
	50,0	16,7	87,0	89,2	81,8
	60,0	20,0	82,7	87,5	81,1
Каменный уголь	40,0	13,3	77,5	74,1	73,6
	50,0	16,7	71,3	69,0	67,7
	60,0	20,0	71,2	71,4	67,3

#### 4.5 Исследования с предварительным отсевом мелких классов

Для экспериментального изучения влияния предварительного выделения мелких классов на эффективность ситовой вибрационной классификации были проведены лабораторные исследования на пробе кузбасского каменного угля крупностью -5+0 мм. Выбор объекта исследования определялся тем, что каменный уголь - это сырье с низкой удельной и насыпной плотностью, грохочение которого проводят в толстом слое материала, и факторы реологических свойств такой смеси и ее сегрегации оказывают сильное влияние на ЭГ. Гранулометрическая характеристика пробы приведена в Таблице 4.10. Истинный гранулометрический

состав пробы и продуктов отсева определяли на ситовом анализаторе с орбитальными колебаниями и встряхиванием (типа Ро-Тап) в течение 10 минут.

Таблица 4.10 - Гранулометрический состав пробы угля

Крупность, мм	Содержание, %
-5,0+2,5	36,8
-2,5+2,0	5,1
-2,0+1,6	8,0
-1,6+0,63	21,7
-0,63+0,32	11,5
-0,32	16,9
Итого	100,0

Результаты опытов показали, что последовательная вибрационная классификация от мелкого класса к крупному позволяет за разумный период времени заметно повысить общую эффективность классификации по классу - 2,5 мм (Рисунок 4.13). При этом скорость классификации угля за счет его большой подвижности оказалась высокой – выход основной массы мелкого класса достигался менее, чем за две минуты.

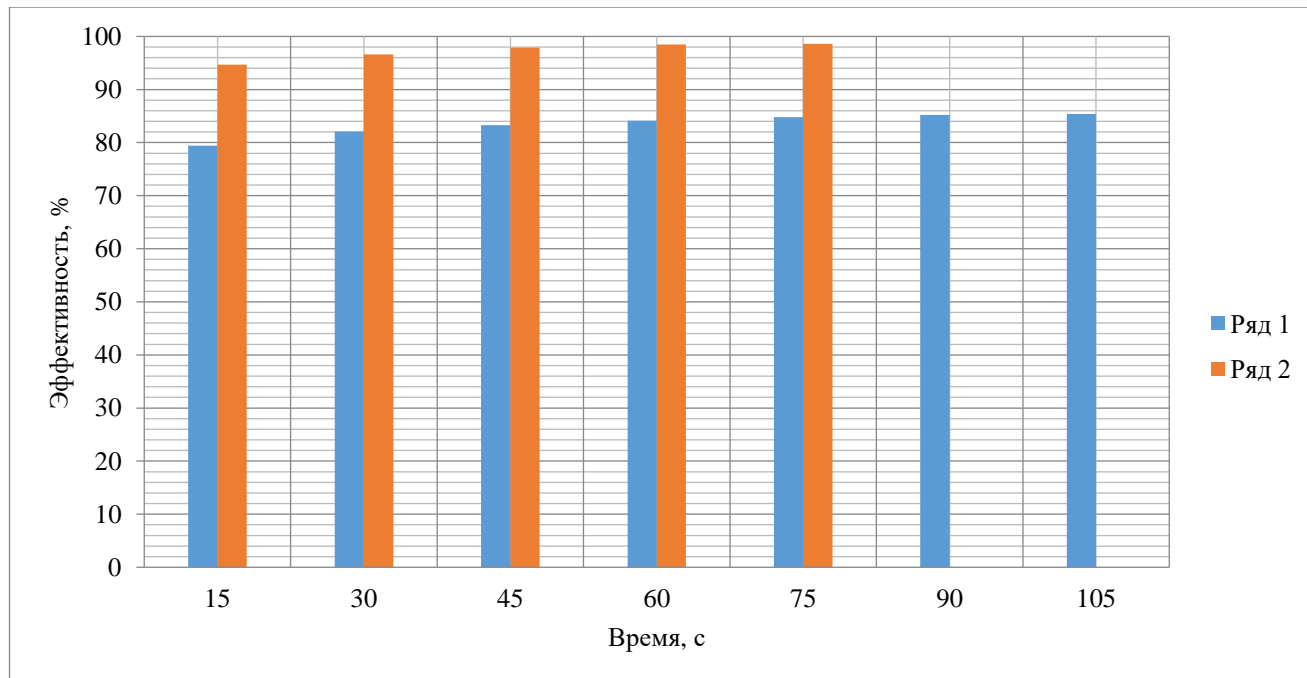


Рисунок 4.13 - Кинетика классификации угля (эффективность по классу 2,5 мм на сите с отверстиями 2,5 мм (ряд 1) и последовательно на ситах 2,0 и 2,5 мм (ряд 2)) [17]

Следует отметить, что значимый прирост эффективности классификации достигался при сравнительно малом отличии в размере отверстий просеивающих поверхностей – всего в 20 %.

Объяснением полученных результатов является, по-видимому, различие свойств сыпучего материала (в нашем случае каменного угля) полидисперсного состава и материала, из которого удалена значительная часть тонкой фракции (Таблица 4.11). Измерения насыпной плотности фракций и его эффективной вязкости проводили по методике, изложенной в [17]. Вязкость (текучесть) материала крупностью -5 мм и -2,5 мм замеряли в вискозиметрах свободного истечения с различным диаметром насадок.

Таблица 4.11 - Физические свойства различных фракций угля

Свойства	Крупность, мм	-5,0+0	-2,5+0	-2,5+2,0	-5,0+2,0
Угол естественного откоса, град.		44	44	40	41
Коэф. внутреннего трения		0,97	0,97	0,84	0,87
Насыпная плотность, кг/дм <sup>3</sup>		0,77	0,76	0,71	0,73
Эффективная вязкость, град. E°		6,3	5,1	1,1	3,4

Из приведенных данных следует, что фракции угля с более узким гранулометрическим составом предсказуемо отличаются меньшей насыпной плотностью и меньшим коэффициентом внутреннего трения. При этом эффективная вязкость фракций -2,5+2,0 мм и -5,0+2,0 мм намного меньше вязкости исходного материала -5+0 мм. Эффективная вязкость фракции -2,5+2,0 мм вообще близка к вязкости воды. Отметим, что вариативность подвижности различных фракций крупности угля связаны исключительно с их гранулометрическим составом, поскольку микроскопическое исследование не показало сколько-нибудь значимых отличий их минералогического состава и шероховатости поверхности.

Следует отметить, что полученные данные по эффективности последовательной классификации не относятся исключительно к углю. Так, были проведены опыты последовательного тонкого сухого грохочения мелкодробленой апатитовой руды и медно-никелевой руды крупностью -2,0 мм на ситах 0,50 и 0,63 мм от мелкого класса к крупному в условиях предыдущего эксперимента классификации угля. Опыты продемонстрировали устойчивое повышение эффективности классификации на 4-5 % (Рисунки 4.14 и 4.15). Однако такой



подход представляет практический интерес в первую очередь для классификации легких полезных ископаемых, грохочение которых проводят исключительно в толстом слое материала.

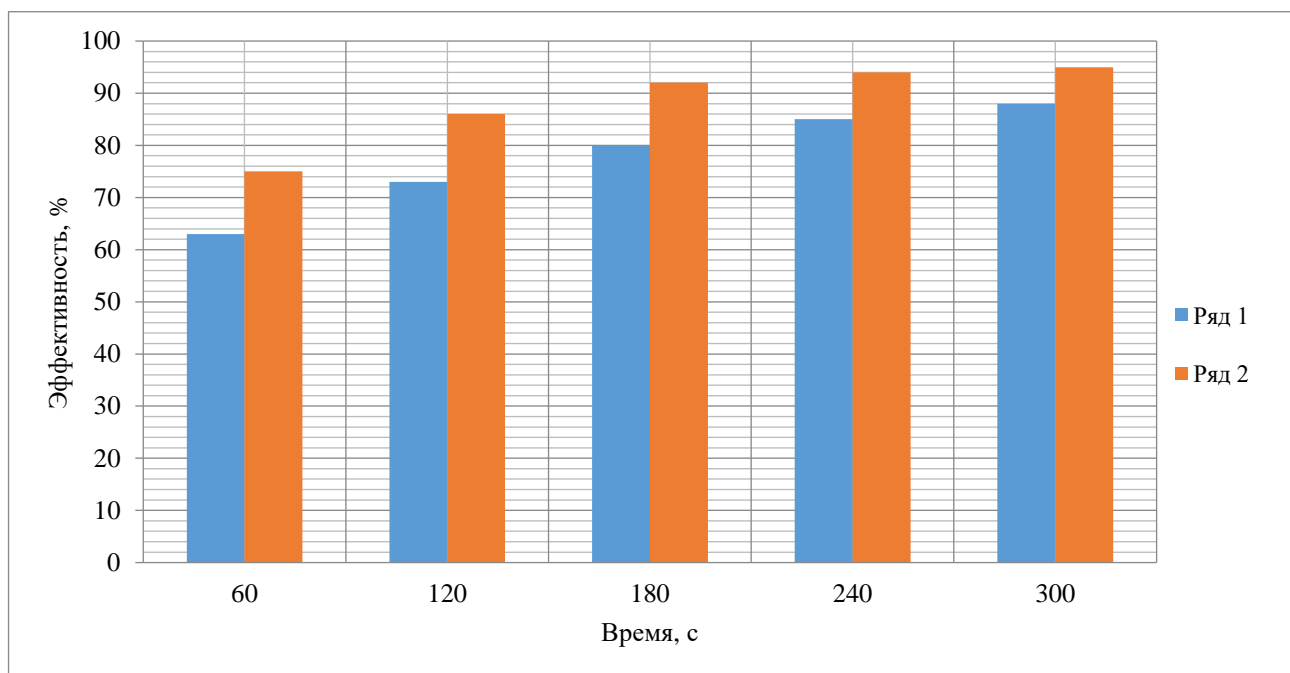


Рисунок 4.14 - Кинетика классификации апатитовой руды (эффективность по классу 0,63 мм на сите с отверстиями 0,63 мм (ряд 1) и последовательно на ситах 0,5 и 0,63 мм (ряд 2)) [17]

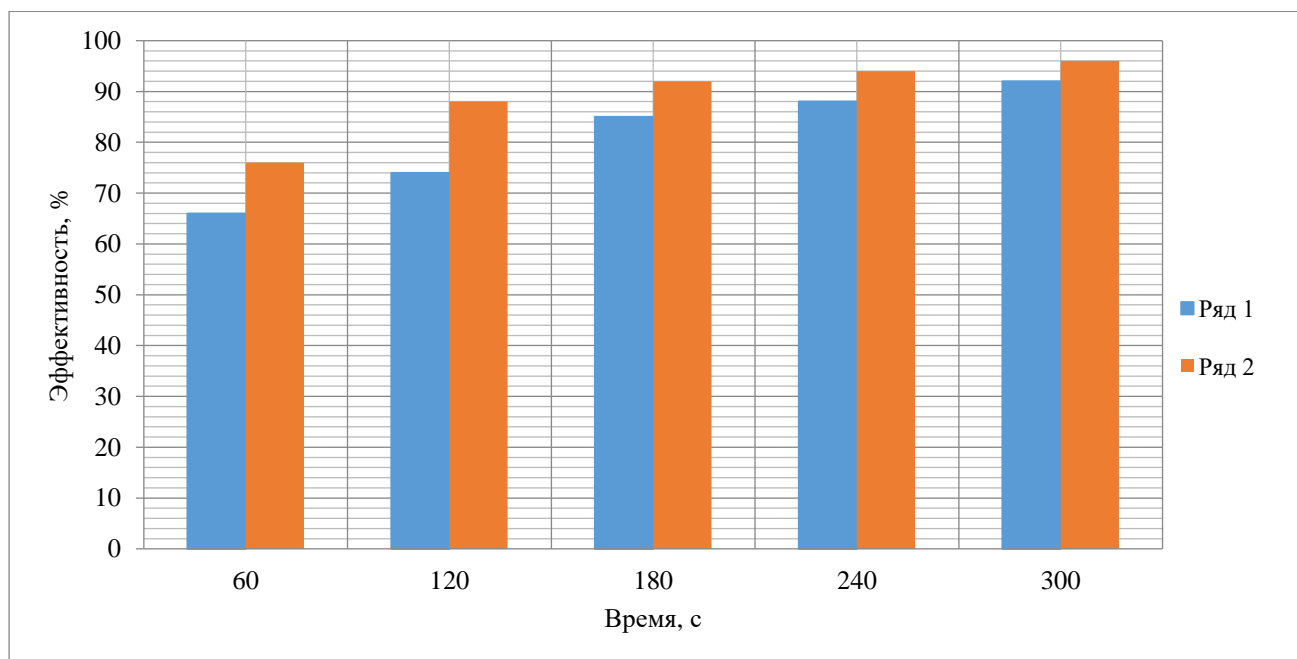


Рисунок 4.15 - Кинетика классификации медно-никелевой руды (эффективность по классу 0,63 мм на сите с отверстиями 0,63 мм (ряд 1) и последовательно на ситах 0,5 и 0,63 мм (ряд 2)) [17]

Разумеется, отмеченные еще много лет назад эксплуатационные недостатки непосредственного грохочения на многоситных машинах в последовательности от мелкого класса к крупному не опровергнуты. Тем не менее, приведенные выше

результаты исследований открывают перспективу иных видов грохочения с предварительным выделением мелких классов крупности.

#### 4.6 Исследования вибрационного грохочения с одновременным боковым отсевом мелких классов (сита сложной формы)

Установленное оптимальное значение частоты вибрации (около 16 Гц) было использовано при проведении исследования грохочения с одновременным боковым отсевом мелких классов.

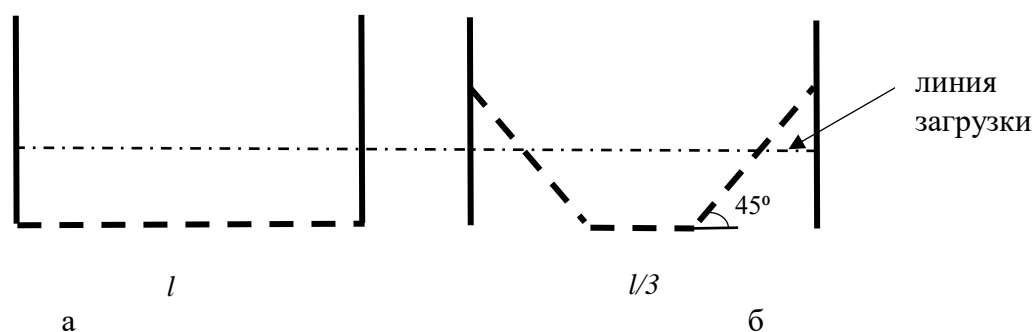


Рисунок 4.16 - Профиль просеивающих поверхностей (а - плоская, б - трапецеидальная) [22]

Просеивающая поверхность №1 - плоская стальная с круглыми ячейками диаметром 4 мм, размер поверхности (ДхШ): 950х120 мм, площадь просеивающей поверхности: 0,114 м<sup>2</sup> (Рисунок 4.16.а).

Просеивающая поверхность №2 - трапецеидальная стальная с круглыми ячейками диаметром, размер донной части (ДхШ): 950х40 мм, размер бортовых поверхностей (ДхШ): 950х56 мм, внутренний угол наклона боковых поверхностей: 135 град., общая площадь просеивающей поверхности: 0,143 м<sup>2</sup> (Рисунки 4.16.б и 4.17).



Рисунок 4.17 - Сита сложной формы

Эффективные площади просеивающих поверхностей №1 и №2 в горизонтальной проекции равны и составляют 0,114 м<sup>2</sup>.

Объект испытаний: кузбасский каменный энергетический уголь с зольностью 15 %. Для минимизации выхода тонких классов при дроблении пробы угля использовались вибрационные конусные и щековые дробилки нового поколения [37; 45]. Гранулометрическая характеристика исходного угля приведена в Таблице 4.12.

Таблица 4.12 - Гранулометрическая характеристика пробы угля

Класс крупности, мм	Содержание, %
-20,0+10,0	34,0
-10,0+5,0	24,3
-5,0+4,0	5,7
-4,0+3,2	2,0
-3,2+2,5	4,3
-2,5+1,6	6,3
-1,6	23,4
Исходный	100,0

Параметры грохочения: угол наклона короба грохота 17 град., амплитуда колебаний 3 мм, частота 16,7 с<sup>-1</sup>, виброускорение 33,0 м/с<sup>2</sup> или 3,4G. Дозирование осуществлялось с помощью вибрационного питателя. Контроль загрузки питания проводился по медиане трапецеидального сита в центральной части обеих просеивающих поверхностей по длине для идентичности геометрии надрешетного

слоя материала.

В результате серии испытаний при грохочении угля на плоском сите №1 эффективность классификации по классу -4 мм составила 80,2 %, по классу -1,6 мм – 81,3 %. Удельная производительность по питанию составила 13,0 т/(ч·м<sup>2</sup>).

При грохочении на трапецеидальном сите № 2 (Рисунок 4.18) эффективность классификации по классу -4 мм составила 84,4 %, а по классу -1,6 мм – 84,8 %. Расчетная удельная производительность на горизонтальную проекцию сита составила 15,9 т/(ч·м<sup>2</sup>). При этом подрешетный продукт боковых просеивающих поверхностей в результате движения частиц по сложной траектории был преимущественно представлен классом -2,5 мм. Более детальные показатели грохочения на сите №2 представлены в Таблице 4.13.

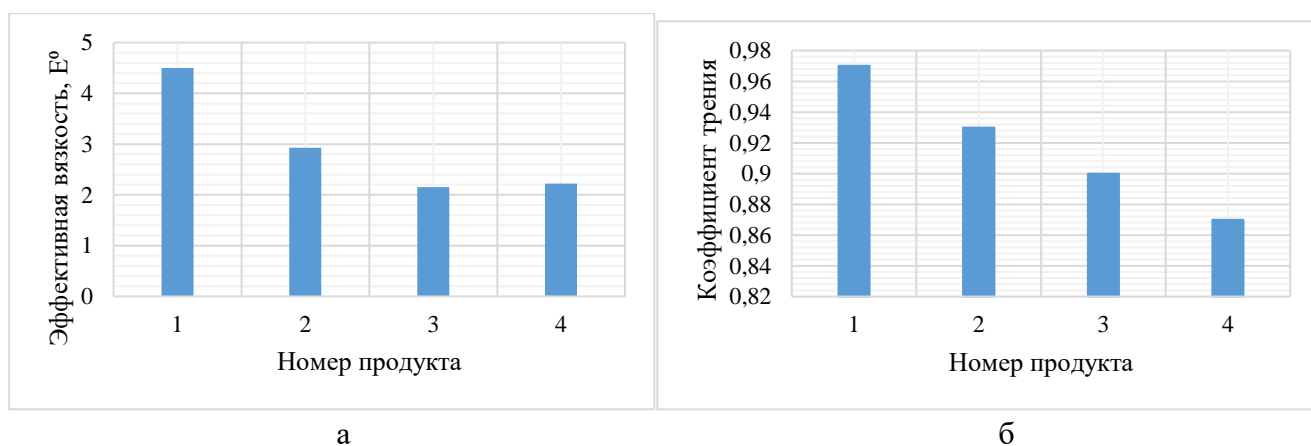


Рисунок 4.18 - Испытания процесса «градиентной» вибрационной классификации сыпучих материалов

Таблица 4.13 - Результаты классификации на трапецеидальном сите

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание классов, %		Вклад в извлечение классов крупности, %	
		Класс -4 мм	Класс -1,6 мм	Класс -4 мм	Класс -1,6 мм
Надрешетный	69,6	8,0	5,1	15,6	15,2
Подрешетный нижний	18,4	100,0	60,3	51,1	47,4
Подрешетный боковой	12,0	100,0	72,9	33,3	37,4
Подрешетный суммарный	30,4	100,0	65,3	84,4	84,8
Исходный	100,0	36,0	23,4	100,0	100,0

Данные о реологических свойствах отдельных продуктов классификации приведены на Рисунке 4.19. Эффективная вязкость в градусах Энглера определялась на вискозиметре свободного истечения, а коэффициент внутреннего трения рассчитывался на основании измерения угла естественного откоса. Из приведенных данных следует, что подвижность донных и боковых подрешетных продуктов, полученных при классификации на трапецеидальном сите, заметно выше, чем у подрешетного продукта плоского сита.



а – эффективная вязкость, E°, б – коэффициент внутреннего трения  
 Продукты: 1 – исходный, 2- подрешетный (серия 1), 3 - подрешетный донный (серия 2),  
 4 - подрешетный боковой (серия 2).

Рисунок 4.19 - Реологические свойства продуктов классификации угля [17]

Из приведенных экспериментальных данных серии стендовых испытаний следует, что суммарная эффективность сухого ВГ на трапецеидальном сите на 3,5-4 % выше, чем на плоском сите, несмотря на то, что удельное извлечение

расчетных классов крупности через боковые ситовые поверхности не столь велико. При этом удельная производительность грохота с трапецеидальным ситом на 22 % была выше, чем на плоском в расчете на горизонтальную проекцию. Отметим, что при проведении испытаний изначально не ставилась задача максимизации производительности машины с трапецеидальным ситом. Важным фактором, объясняющим эти положительные явления и подтверждающим ранее выполненные лабораторные исследования по последовательному грохочению от мелкого класса к крупному, является то, что продукты с более узким гранулометрическим составом являются более подвижным сыпучим материалом, легче проходящим через просеивающие поверхности.

#### 4.7 Анализ и сравнение полученных результатов

По полученным данным глав 4.2, 4.3 и 4.4 построены графики зависимостей ЭГ от частоты вращения ротора (Рисунки 4.20-4.22).

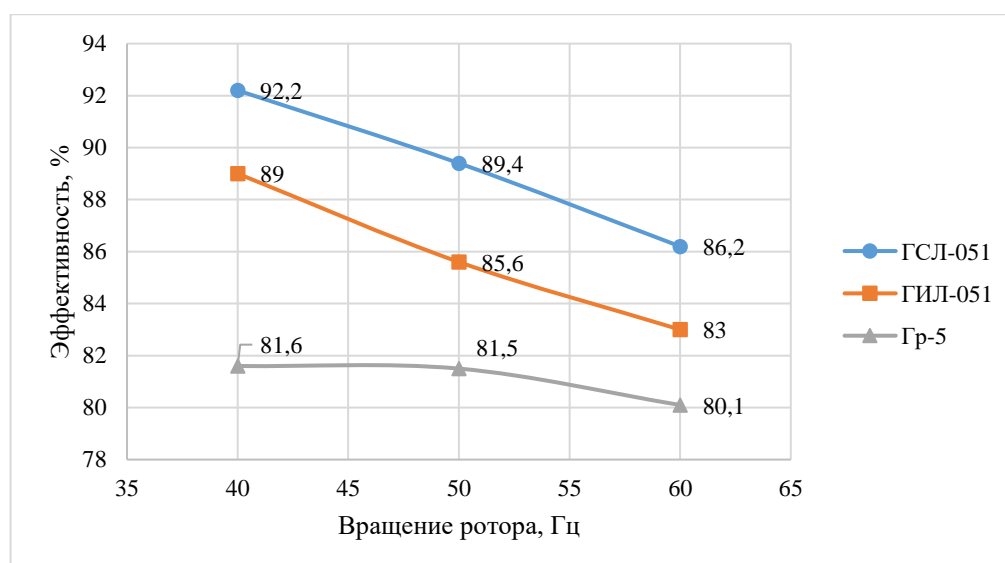


Рисунок 4.20 - Зависимость значения эффективности грохочения от значения вращения ротора для разных типов грохотов для апатитовой руды

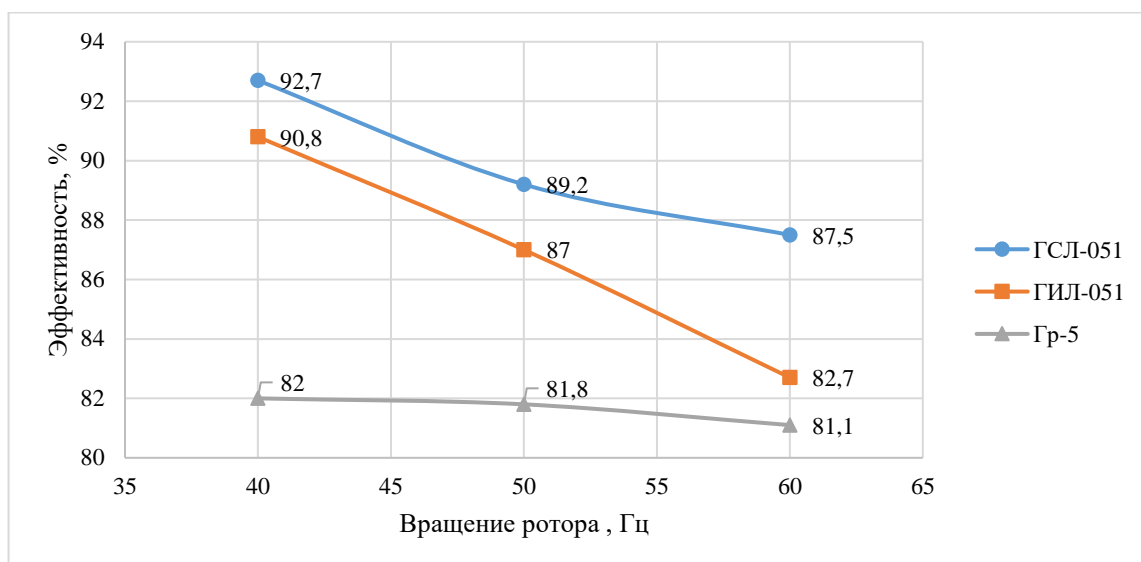


Рисунок 4.21 - Зависимость значения эффективности грохочения от значения вращения ротора для разных типов грохотов для медно-никелевой руды

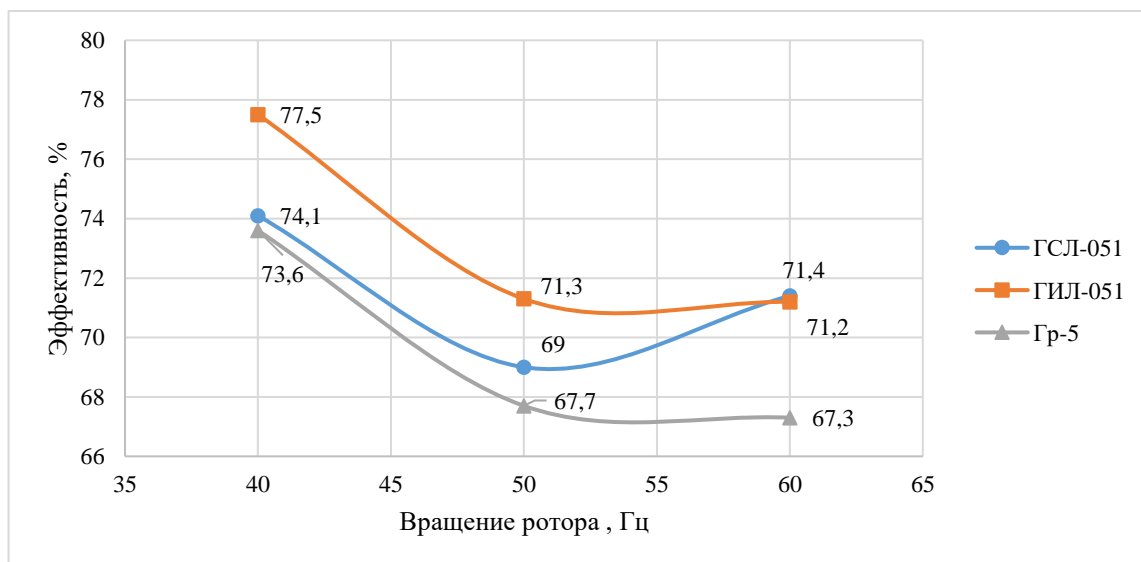


Рисунок 4.22 - Зависимость значения эффективности грохочения от значения вращения ротора для разных типов грохотов для каменного угля

Исходя из полученных результатов испытаний грохотов с различной траекторией вибрационных воздействий можно сделать вывод, что в общем случае эффективность ВГ понижается с повышением частоты колебаний корпуса грохота в технически реализуемом диапазоне частот тока вибропривода 40-60 Гц (что соответствует  $12,6-17,7 \text{ c}^{-1}$  для частоты колебаний корпуса). Как видно из Таблицы 4.9, самобалансный грохот отличается наибольшей эффективностью для рудного сырья. Такой результат можно объяснить тем, что самобалансный грохот

имеет меньшую скорость пребывания частиц на просеивающей поверхности, что приводит к увеличению времени пребывания частиц на сите. Более продолжительное время нахождения материала ведет к увеличению количества «подскоков» отдельной частицы, что увеличивает вероятность прохождения данной частицы через просеивающую поверхность. Таким образом, можно сделать вывод, что меньшая скорость транспортирования материала по ситам ведет к увеличению ЭГ.

Установлено, что ЭГ *рудного сырья* уменьшается в ряду грохотов со следующими типами колебаний: прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в вертикальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости. Разница в ЭГ на грохотах с прямолинейными и орбитальными в вертикальной плоскости колебаниями (грохоты ГСЛ-051 и ГИЛ-051) заметна. ЭГ на грохоте с горизонтальными орбитальными колебаниями значительно ниже.

ЭГ каменного угля при любых испытанных частотах колебаний отличается от тенденции показателей грохочения рудного сырья и уменьшается в ряду грохотов со следующими типами колебаний: орбитальными в вертикальной плоскости – прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости. ЭГ на грохоте с горизонтальными орбитальными колебаниями также заметно ниже. Более низкие показатели ЭГ угля можно объяснить малой скоростью вертикальной сегрегации материала, имеющего низкую абсолютную и насыпную плотность. Кроме того, процесс грохочения на круглых грохотах, широко применяемых, например, в абразивной промышленности, но мало распространенных в горнорудной промышленности, осложняется очевидной неравномерностью загрузки ситовой поверхности за счет центробежной силы, прижимающей материал к периферии короба.

Из проведенных исследований можно сделать предварительный вывод, что дальнейшую интенсификацию процесса сухого ВГ сыпучих материалов, особенно материалов с малой насыпной плотностью, следует вести в направлении совершенствования технологий с использованием, в том числе, просеивающих поверхностей грохотов с новой геометрической конфигурацией.



В процессе серии стендовых испытаний на базе пилотной установки, оснащенной ситами сложного профиля, показано, что эффективность и удельная производительность предлагаемого метода градиентной классификации легких сыпучих материалов существенно выше, чем на традиционных плоских ситовых поверхностях. Полученные результаты могут быть использованы при конструировании более эффективных промышленных вибрационных классификаторов.

### **Выводы по четвертой главе**

1 Определены технологические показатели грохочения при различной крупности разделения и различной частоте питающего тока вибровозбудителя грохота.

2 Проведено исследование влияния различных траекторий вибрационных воздействий на ЭГ. Таким образом, установлено, что ЭГ *рудного сырья* уменьшается в ряду грохотов со следующими типами колебаний: прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в вертикальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости. ЭГ *каменного угля* уменьшается в ряду грохотов со следующими типами колебаний: орбитальными в вертикальной плоскости - прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости.

3 Прямые эксперименты показали, что принцип грохочения «от мелкого класса к крупному» реализуем. Повышается и скорость классификации, и суммарная эффективность классификации.

4 Выполнены полупромышленные испытания технологии градиентной классификации (грохочения). Предложен, изготовлен и испытан стенд для испытаний процесса градиентной вибрационной классификации сыпучих материалов по крупности.

## ГЛАВА 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ

### 5.1 Технико-экономический анализ эффективности разработки

Для оценки технико-экономической эффективности разработанной технологии градиентной классификации была спланирована и поставлена серия дополнительных экспериментальных исследований по грохочению угля с учетом требований к его крупности [54]. По действующим нормам к рядовым энергетическим и коксующимся углям относят кусковой каменный уголь крупнее 6 мм. Уголь фракции мельче 6 мм относят к так называемому штыбу (от нем. *Staub* – пыль). Рыночная оптовая стоимость кускового угля за счет его более высоких потребительских свойств существенно выше стоимости штыба. Неклассифицированный каменный уголь обычно подвергают дроблению, после чего из него выделяют (отсеивают) путем ВГ класс -6 мм. Класс +6 мм в зависимости от зольности или напрямую отгружают потребителям для производства кокса, или подвергают обогащению в тяжелых средах, обычно в сепараторах барабанного типа. Класс -6 мм (штыб) в зависимости от зольности или направляют потребителям на тепловые электростанции, или предварительно подвергают обогащению в тяжелосредних циклонах [3].

Поскольку в результате стендовых испытаний технологии градиентной классификации, результаты которых изложены в главах 4.6 и 4.7, были получены положительные результаты, в рамках настоящей работы выполнены исследования вибрационной классификации угля по регламентируемой граничной крупности 6 мм. Исходная проба взята из исследованной ранее партии кузбасского угля с зольностью 15 %. Детальная гранулометрическая характеристика пробы приведена в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Гранулометрическая характеристика кузбасского угля

Классы крупности, мм	Выход, %		
	+20,0	1,6	-
-20,0+8,0	36,7	-	-
-8,0+6,0	20,0	20,0	-
-6,0+2,5	12,9	12,9	12,9

Продолжение таблицы 5.1

-2,5+1,4	6,4	6,4	6,4
-1,4+0,63	11,5	11,5	11,5
-0,63+0,32	7,3	7,3	7,3
-0,32	3,6	3,6	3,6
Всего	100,0	61,7	41,7

Сравнительная классификация угля проводилась на той же полупромышленной установке с орбитальными колебаниями в вертикальной плоскости, описанной в главе 4.2, но в качестве просеивающих поверхностей были использованы плетеные стальные сита с квадратными ячейками 6 мм (для плоской и трапецидальной поверхности). Живое сечение сит составляло 53 % [59]. Грохочение проводили при частоте колебаний короба 14,1 Гц, при этом производительность грохотов в серии выдерживалась на одинаковом уровне загрузки грохотов по средней линии короба в центральной его части с использованием регулируемого вибрационного питателя. Удельная производительность грохота с плоским ситом по исходному продукту составила 10,7 т/(ч·м<sup>2</sup>), а грохота с трапецидальным ситом 13,9 т/(ч·м<sup>2</sup>), т.е. на 30 % выше.

ЭГ на плоской просеивающей поверхности с ячейками 6 мм составила 82,7 %. Загрязнение надрешетного продукта зернами – 6 мм составило 8,72 %. Зольность надрешетного/подрешетного продуктов составила 13 %/17 %.

ЭГ на трапецидальной просеивающей поверхности с ячейками 6 мм составила 88 %. Загрязнение надрешетного продукта зернами – 6 мм составило 5,69 %. Зольность надрешетного/подрешетного продуктов составила 13 %/17 %.

Повысить производительность грохотов за счет повышения частоты колебаний не представлялось возможным из-за частичного выброса кусков угля через борта короба.

Повысить производительность грохота с плоским ситом возможно при переходе на сито с ячейками 8 мм, однако в результате прямого эксперимента было установлено, что загрязнение подрешетного продукта классом -8+6 мм составило около 7 %, что является прямой потерей товарного кускового угля.

Ожидаемый экономический эффект разработки технологии градиентной классификации заключается в возможности повысить производительность грохота, оснастив его трапецеидальным градиентным ситом и, соответственно, уменьшить количество эксплуатируемых машин без снижения качества продукции.

На условной углеобогащательной фабрике средней мощности 4 млн т угля в год при экспериментально достигнутой удельной производительности грохотов в режиме трехсменной работы потребуется 4 градиентных грохота на платформе инерционного грохота ГИС-61(62) с площадью ситовой поверхности в вертикальной проекции 9,3 м<sup>2</sup> вместо 5 стандартных инерционных грохотов ГИС-61(62) с мощностью привода 18,5 кВт.

Стоимость переоборудования четырех грохотов на трапецеидальные поверхности составит по данным НПК «Механобр-техника» около 1,2 млн руб. При коэффициенте движения грохотов 0,95 и коэффициенте потребления электроэнергии 0,90 экономия на электрической энергии составит около 415 тыс. руб. в год при ее цене 3 руб./кВт·ч. Среднее ожидаемое удорожание электроэнергии на время жизни проекта принято по данным Минэнерго РФ.

Вибрационные промышленные грохоты относятся к пятой амортизационной категории оборудования с нормативным сроком окупаемости 7 лет, поэтому при стоимости стандартного грохота ГИС-61 1,8 млн руб. экономия предприятия на амортизацию одного грохота дополнительно составит 0,26 млн руб./г.

В рамках главы оценки технико-экономической эффективности и маркетинговой оценки перспективности внедрения технологии градиентной классификации на примере угольной подотрасли положены следующие положения:

1. Технология предназначена для прибыльной и устойчиво развивающейся сырьевой отрасли.
2. Разрабатываемая технология и установка с ее реализацией относятся к индустриальной сфере с достаточно высоким уровнем фондоотдачи.
3. Реализация разработанных технических решений в рамках выполненной НИР не требует специальных мероприятий по развитию

инфраструктуры и привлечению новых трудовых ресурсов. Таким образом, они не требуют сопряженных капитальных затрат и существенных организационных мероприятий.

При оценке экономической привлекательности проекта в рамках данной работы принимались следующие положения, позволяющие проводить укрупненную количественную оценку:

1. Средняя фондоотдача (доходность) производства в выбранной отрасли бралась из открытых данных (финансовых отчетов) передовых предприятий отрасли, публикуемых в открытой печати и в Интернете.

2. Темпы обесценивания денежных средств (коэффициент дисконтирования) при расчете брался умеренно оптимистичным и равным 0,15. Значение коэффициента дисконтирования, соответствующее кризисному макроэкономическому варианту, не рассматривалось. Расчет чистой текущей стоимости и нормы прибыли рассматривался по вариантам срока жизни проекта в пределах четырех лет.

3. За интервал укрупненного инвестиционного планирования брался один год. Первый интервал («нулевой» год) планирования - на период изготовления технической документации и модернизации оборудования принимался бездоходным.

4. Доход от реализации проекта ожидается от прямого энергосбережения и уменьшения суммарной амортизации оборудования.

Технико-экономическая оценка коммерческой привлекательности проекта выполнена с применением метода вариантного дисконтного анализа, с учетом обесценивания вложенных средств и поступлений в течение срока жизни проекта. Наиболее распространенными среди методов дисконтирования являются два метода:

- определение чистой текущей стоимости;
- расчет внутренней нормы прибыли.

Оба этих метода применены при маркетинговом анализе рекомендуемой разработки.

Текущая стоимость проекта представляет собой сумму дисконтированных поступлений и затрат в течение всего срока жизни проекта. При расчете потоков денежных средств принимаются во внимание только те из них, которые имеют непосредственное отношение к осуществлению и функционированию проекта.

Разность между притоком и оттоком средств за один какой-либо интервал планирования называется «чистым потоком денежных средств» - *net cash flow (NCF)*. Очевидно, что на этапе строительства (монтажа) чистый поток денежных средств будет всегда отрицательным. Для определения «чистой текущей стоимости проекта» - *net present value (NPV)* - надо значения чистых потоков по всем интервалам планирования дисконтировать, то есть пересчитать на текущий момент, в качестве которого принимается «нулевой» интервал планирования. Пересчет осуществляется с помощью множителя дисконтирования – *discount factor (D)*, который, в свою очередь, можно определить по формуле:

$$D_i = 1/(1+d)^i, \quad (5.1)$$

где  $D$  – фактор дисконтирования для  $i$ -го интервала,  $d$  – норма (коэффициент) дисконтирования в виде десятичной дроби.

Норма дисконтирования для расчетов принимается постоянной величиной, и выбирается исходя из уровня процентных ставок по долгосрочным кредитам с учетом факторов риска. При этом он сопоставляется с минимальной нормой окупаемости (прибыльности), ниже которой предприниматель или инвестор считает нецелесообразным вкладывать имеющийся капитал.

Формула для расчета чистой текущей стоимости выглядит следующим образом:

$$NPV = NCF_1D_1 + NCF_2D_2 + \dots NCF_iD_i + \dots NCF_kD_k, \quad (5.2)$$

где  $NCF_i$  - чистый денежный поток в  $i$ -том интервале,  $D_i$  - фактор дисконтирования.

Фактор дисконтирования за первый интервал принимается равным единице. Если чистая текущая стоимость проекта принимает положительное или нулевое значение, то данный проект можно считать приемлемым при данном расчетном

периоде. Это означает, что инвестор не только вернет вложенные средства, но может рассчитывать и на прибыль. Из нескольких вариантов следует принимать то значение, *NPV* которого больше.

Расчет внутренней нормы прибыли – *internal rate of return (IRR)* - второй наиболее известный метод финансовой оценки и рыночной привлекательности проекта. Внутренняя норма прибыли – это такой коэффициент (норма) дисконтирования, при котором чистая текущая стоимость проекта принимает нулевое значение. Фактически, задача определения чистой текущей стоимости решается с другого конца – ищется ответ на вопрос, при каком темпе обесценивания денег инвестор останется «при своих», или на какой уровень рентабельности инвестор может рассчитывать при реализации проекта.

Изложенная методика первоначально была рекомендована Комитетом ООН по промышленной политике UNIDO, а затем была включена в инструкции о порядке разработки, согласования и составе обоснований инвестиций Минстроя РФ и Минэкономразвития РФ.

## 5.2 Расчет инвестиционной привлекательности проекта (разработки)

Наименование разработки: Градиентная вибрационная классификация угля.

Исходные данные для расчета инвестиционной привлекательности разработки представлены в Таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Исходные данные для расчета

Наименование	Значение
Объем капитальных вложений, млн руб. (модернизация 4 грохотов)	1,2
Коэффициент дисконтирования $d$	0,15
Высвобождение установочной мощности, кВт	18,6
Режим работы	
• сменность	3
• коэффициент движения оборудования	0,95
• количество часов работы в год	8 322
Амортизационные отчисления на 1 грохот, млн руб. в год	0,26
Расчетная цена электроэнергии, тыс. руб./тыс. кВт·час	3,0
Энергосбережение (Q), тыс. кВт·час	138,0
Энергосбережение (C), млн руб. в год	0,415

В Таблицах 5.3-5.4 приведены расчеты экономической привлекательности разработки.

Таблица 5.3 - Расчет экономической эффективности

Наименование	Значение				
	XX0	XX1	XX2	XX3	XX4
Интервал планирования (год)					
Капитальные вложения (отток), млн руб.	-1,2				
Чистый поток денежных средств (NCF), исходя из базового варианта, млн руб.	-1,2	0,260	0,260	0,260	0,260
Энергосбережение, млн руб.		0,415	0,415	0,415	0,415
Энергосбережение с учетом удорожания энергии, млн руб.		0,425	0,425	0,425	0,425
Чистый поток денежных средств (NCF) с учетом энергосбережения, млн руб.	-1,2	1,10	1,10	1,10	1,10
Коэф. дисконтирования d	1,00	0,15	0,15	0,15	0,15
Множитель дисконтирования Di		0,87	0,87	0,87	0,87
NCFi * Di, млн руб.	-1,2	0,96	0,96	0,96	0,96
Чистая текущая стоимость (NPV) проекта, млн руб.	-1,2	-0,24	0,56	1,31	1,94

Таблица 5.4 - Расчет внутренней нормы прибыли (IRR) по предлагаемому варианту

Наименование	Значение						
	XX0	XX1	XX2	XX3	XX4	XX5	Сумма
Интервал планирования (год)							
NCFi	-1,2	1,10	1,10	1,10	1,10		3,20
NCFi*Do	-1,2	0,61	0,33	0,18	0,10	0,00	0,02
Do	0,550						
do = IRR	0,82						
Интервал планирования (год)							
NCFi	-1,2	1,10	1,10	1,10	1,10		3,20
NCFi*Do	-1,2	0,63	0,36	0,20	0,12		0,10
Do	0,57						
do = IRR	0,75						
Интервал планирования (год)							
NCFi	-1,2	1,10	1,10	1,10			2,10
NCFi*Do	-1,2	0,66	0,40	0,24			0,09
Do	0,60						
do = IRR	0,67						



Продолжение таблицы 5.4

Интервал планирования (год)	XX0	XX1	XX2				
NCFi	-1,2	1,10	1,10				1,00
NCFi*Do	-1,2	0,76	0,52				0,08
Do	0,69						
do = IRR	0,45						
Интервал планирования (год)	XX0	XX1					
NCFi	-1,2	1,10					-0,10
NCFi*Do	-1,2	1,09					-0,11
Do	0,99						
do = IRR	Н/О						

### 5.3 Результаты расчетов

Прибыльность проекта обеспечивается к концу второго года эксплуатации разработанной технологии. Срок окупаемости при коэффициенте дисконтирования 0,15 составляет около двух лет. Суммарный дисконтированный экономический эффект для углеобогадательного предприятия средней мощности около 1,9 млн руб. Для достижения разумного времени окупаемости проекта внутреннюю норму прибыли IRR можно поддерживать в районе 40 % годовых.

Форс-мажорные варианты развития отечественной и мировой экономики не рассматривались.

### Выводы по пятой главе

Результаты выполненного технико-экономического анализа эффективности разработки градиентной вибрационной классификации угля показали:

1. Суммарный дисконтированный экономический эффект для углеобогадательного предприятия средней мощности составляет к четвертому году жизни проекта около 1,9 млн. руб.
2. Срок окупаемости при коэффициенте дисконтирования 0,15 составляет около двух лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты выполненных исследований:

1. Установлено влияние значимых физических свойств различных типов перерабатываемого сыпучего материала на эффективность грохочения. Так, для легких полезных ископаемых, имеющих низкую насыпную плотность и, соответственно, сравнительно низкую эффективность грохочения, необходимо усовершенствование технологии грохочения, предусматривающее совершенствование геометрической конфигурации коробов и просеивающих поверхностей грохотов.

2. Экспериментально подтверждено влияние траекторий вибрационных воздействий в различных плоскостях на показатели грохочения в ходе корректного их сопоставления, в том числе, в полупромышленном масштабе. Результаты показали, что эффективность грохочения рудного сырья уменьшается в ряду грохотов со следующими типами колебаний: прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в вертикальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости. Эффективность грохочения каменного угля при любых испытанных частотах колебаний отличается от тенденции показателей грохочения рудного сырья и уменьшается в ряду грохотов со следующими типами колебаний: орбитальными в вертикальной плоскости – прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости. Более низкие показатели эффективности грохочения угля объясняются малой скоростью вертикальной сегрегации материала, имеющего низкую абсолютную и насыпную плотность.

3. По результатам исследования с предварительным отсевом мелких классов отмечено устойчивое повышение эффективности классификации на 4-5 %.

4. Предложена усовершенствованная технология грохочения с использованием просеивающих поверхностей новой сложной формы, обеспечивающая повышение эффективности процесса грохочения. Эффективность грохочения на ситах сложной формы на 3,5-4 % выше по сравнению с традиционным плоским ситом. Так же было установлено увеличение производительности процесса с использованием сит сложной формы на 22 %.

5. Проведен технико-экономический анализ эффективности внедрения разработки градиентного вибрационного грохочения, показывающий суммарный дисконтированный экономический эффект для углеобогадательного предприятия средней мощности. Суммарный дисконтированный экономический эффект для углеобогадательного предприятия средней мощности составляет к четвертому году жизни проекта около 1,9 млн руб. Срок окупаемости при коэффициенте дисконтирования 0,15 составляет около двух лет, что свидетельствует об экономической эффективности разработки.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ВГ – вибрационное грохочение;

ЭГ – эффективность грохочения;

ГИЛ – грохот инерционный легкого типа;

ГСЛ – грохот самобалансный легкого типа;

IRR – internal rate of return (внутренняя норма прибыли);

NCF – net cash flow (чистый денежный поток);

NPV – net present value (чистая текущая стоимость).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авдохин В.М. Обогащение углей: Учебник для вузов: В 2 т. — М.: Издательство «Горная книга», 2012. — Т. 1. Процессы и машины. — 424 с.: ил. (ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ)
2. Авдохин В.М. Обогащение углей: Учебник для вузов: В 2 т. — М.: Издательство «Горная книга», 2012. — Т. 2. Технологии. — 475 с.: ил. (ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ)
3. Александрова Т.Н., Рассказова А.В. Исследование зависимости качества угольных топливных брикетов от технологических параметров их производства // Записки горного института. 2016. Т. 220. С. 573-577.
4. Александрова Т.Н., Кусков В.Б., Львов В.В., Николаева Н.В. Обогащение полезных ископаемых. Учебник. РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный», Заказ 503. С 144 (ISBN 978-5-94211-731-3), 2015, 530 с.
5. Андреев Е.Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: учебник для вузов / Е.Е. Андреев, О.Н. Тихонов. - Санкт-Петербург: Изд-во СПГГИ(ТУ), 2007. 439 с.
6. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Недра, Москва, 1980 г., 415 с.
7. Арсентьев В.А., Вайсберг Л.А., Устинов И.Д. Направления создания маловодных технологий и аппаратов для обогащения тонкоизмельчённого минерального сырья // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2014. №5. С. 2-9.
8. Арсентьев В.А., Вайсберг Л.А., Устинов И.Д., Герасимов А.М. Перспективы сокращения использования воды при обогащении угля // Известия вузов. Горный журнал. 2016. №5. С. 97-100.
9. Арсентьев В.А., Вайсберг Л.А., Шулюяков А.Д., Ромашев А.О. Технологии утилизации отходов производства инертных нерудных материалов // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2012. №5. С. 51-54.

10. Арсентьев В.А., Герасимов А.М., Дмитриев С.В., Самуков А.Д. Исследование изменения физико-механических свойств каменного угля в процессе термического модифицирования // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2016. №3. С. 3-8.

11. Балдаева Т.М. Сравнительная эффективность классификации на различных типах грохотов // Сборник докладов на школе молодых ученых Международной конференции Плаксинские чтения-2016 «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» Санкт-Петербург. 2016. С. 12-17.

12. Балдаева Т.М. Эффективность предварительного отсева мелких классов при вибрационной классификации // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2017. №5. С. 3-6.

13. Балдаева Т.М., Вайсберг Л.А., Иванов К.С. Сравнительная эффективность вибрационного грохочения при различных формах колебаний // Научно-технический журнал «Горный информационно-аналитический бюллетень». М.: Издательство: «Горная книга». 2015. №11 (специальный выпуск 60-2) С. 479-489.

14. Балдаева Т.М., Вайсберг Л.А., Иванов К.С. Энерго- и ресурсосбережение при разделении сыпучих материалов по крупности // Сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию горного факультета «Горное дело в 21-м веке: технологии, наука, образование». Издатель: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Санкт-Петербург. 2015. С. 110.

15. Балдаева Т.М., Вайсберг Л.А., Иванов К.С. Особенности сухого грохочения при различных типах колебаний // Уральский государственный горный университет (УГГУ). Материалы XXI Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». Екатеринбург. 2016. С. 56-59.

16. Балдаева Т.М., Вайсберг Л.А., Иванов К.С. Эффективность вибрационного грохочения при различных типах колебаний // Материалы

Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2016) Санкт-Петербург. 2016. С. 67-68.

17. Балдаева Т.М., Гладкова В.В., Отрощенко А.А., Устинов И.Д. Влияние термической модификации угля на эффективность его вибрационного грохочения. // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2017. №1 С. 3-7.

18. Балдаева Т.М., Иванов К.С. Энергоэффективность грохочения полезных ископаемых при круговых и прямолинейных колебаниях // Сборник тезисов 13-ой Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Издатель: Институт проблем комплексного освоения недр РАН. Москва. 2016. С. 285-286.

19. Балдаева Т.М., Отрощенко А.А. Вибрационное грохочение термомодифицированного угля // Сборник докладов на Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, посвященной Году экологии «Комбинированные и маловодные процессы переработки природного и антропогенного сырья». Санкт-Петербург. 2017. С. 4-14.

20. Бауман В.А., Быховский И.И. Вибрационные машины и процессы в строительстве, М.: Высшая школа, 1977 г. - 255 с.

21. Бауман В.А., Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций, 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1981 г. - 324 с.

22. Бизяев О.Ю., Устинов И.Д., Балдаева Т.М. Испытание технологии полиградиентной вибрационной классификации // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2018. №4. С. 3-6.

23. Блехман И.И. Вибрационная механика.– М.: Физматлит, 1994. – 400 с. (англ. перевод: Vibrational Mechanics (Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, World Scientific, 2000.– 509 p.)

24. Блехман И.И. Самосинхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971, – 260 с.

25. Блехман И.И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике // – М.: Наука. гл. ред. физ. – мат. лит., 1988. - 208 с.
26. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. - СПб, Издательский дом «Руда и Металлы», 2013. – 640 с., ил.154
27. Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б. Градиентная вибрационная сегрегация в процессах разделения сыпучих материалов по крупности // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2015. №5. С. 20-24.
28. Блехман И.И., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Иванов К.С., Якимова К.С. Об износе оборудования в условиях вибрации и ударных нагрузок // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2011. №6. С. 40–45.
29. Блехман И.И., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Якимова К.С. К теории эффекта градиентной вибрационной сегрегации применительно к процессу грохочения // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2015. №6. С. 19-22.
30. Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Якимова К.С. О некоторых «аномальных» эффектах поведения сыпучей среды в сообщающихся вибрирующих сосудах // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2007. №5. С. 36–40.
31. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение, Издательство «Наука», Москва, 1964, 402 с.
32. Блехман И.И., Хайнман В.Я. К теории разделения сыпучих смесей под действием вибрации // Инженерный журнал (МГТТ). 1968. №6. С. 5–13.
33. Вайсберг Л.А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов [Текст]: научное издание / Л.А. Вайсберг. - Москва : Недра, 1986. - 144 с.
34. Вайсберг Л.А. Вибрационные технологии в процессах обогащения: новые результаты и перспективы промышленного применения // Материалы Междунар. науч. конф. «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья». СПб. 2016. С. 21–23.



35. Вайсберг Л.А., Балдаева Т.М., Иванов К.С., Отрощенко А.А. Эффективность грохочения при круговых и прямолинейных колебаниях // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2016. №1 С. 3-9.
36. Вайсберг Л.А., Демидов И.В., Иванов К.С. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2015 №4. С. 21-31.
37. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П. Новое поколение щековых и конусных дробилок // Строительные и дорожные машины. 2000. №7. С. 16-21.
38. Вайсберг Л.А., Иванов К.С. Универсальный метод описания формы частиц, её влияние на результаты ситовой классификации // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2014. №4. С. 34-37.
39. Вайсберг Л.А., Иванов К.С., Мельников А.Е. Совершенствование подходов к математическому моделированию процесса вибрационного грохочения // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2013. №2. С. 22-26.
40. Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения. – Санкт-Петербург: Издательство ВСЕГЕИ. 2005. – 252 с.
41. Вайсберг Л.А., Коровников А.Н., Балдаева Т.М. Инновационные грохоты для промышленности строительных материалов // Издательство ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ». Журнал «Строительные материалы». Москва. 2017. №7 С. 52-55.
42. Вайсберг Л.А., Коровников А.Н., Трофимов В.А. Вибрационное грохочение рудных и нерудных материалов. Инновационные разработки НПК «Механобр-техника» // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2012. №5. С. 35-39.
43. Вайсберг Л.А., Рубисов Д.Г. Вибрационное грохочение сыпучих материалов: моделирование процесса и технологический расчет грохотов. - СПб.: Институт «Механобр», 1994. - 47 с.

44. Вайсберг Л.А., Устинов И.Д., Иванов К.С., Балдаева Т.М. Процесс вибрационного грохочения в термодинамических представлениях // Материалы Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2016). Санкт-Петербург. 2016. С. 19-21.

45. Вайсберг Л.А., Шулюяков А.Д. Технологические возможности конусных инерционных дробилок при производстве кубовидного щебня // Строительные материалы. 2000. №1. С. 8-9.

46. Вибрации в технике: Справочник, т. 1 / Под ред. В.В.Болотина, – М.: Машиностроение, 1981, - 352 с.

47. ВСН 55-69 «Инструкция по определению требуемой плотности и контролю за уплотнением земляного полотна автомобильных дорог» [Текст] введ. 01.08.1969 – М. Министерство транспортного строительства СССР. 1969. 48 с.

48. Газалеева Г.И. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение / Г.И. Газалеева, Е.Ф. Цыпин, С.А. Червяков. –Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. – 914 с.

49. Гнездилов А.А. Обоснование параметров устройства для сухой очистки товарных яиц в виброкипящем слое: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 24 с.

50. Гнездилов А.А., Пехтерев К.А., Пирожков Д.Н., Сорокин С.А. Изменение эффективной вязкости дисперсных сыпучих материалов под воздействием вибрации, Вестник Алтайского аграрного университета №4 (24). 2006. С. 50-53.

51. Годэн А.М. Основы обогащения полезных ископаемых / пер. с англ. М.: Metallurgizdat. 1946. 535 с.

52. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Текст] – Взамен ГОСТ 12536-79; введ. 2015-07-01. - М.: Стандартинформ, 2015. – 19 с.

53. ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия [Текст] – Взамен

ГОСТ 166-73; введ. 01.01.1991. - Москва: Изд. стандартов – 19 с.

54. ГОСТ 17321-2015. Уголь. Обогащение. Термины и определения [Текст] – Взамен ГОСТ 17321-71; введ. 2017-04-01. - М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с.

55. ГОСТ 22524-77. Пикнометры стеклянные. Технические условия; введ. 01.01.1979. - Москва: Изд. стандартов – 22 с.

56. ГОСТ 23788-79. Грохоты инерционные. Общие тех. условия [Текст] / Разработан Мин. тяжелого и транспортного машиностроения. - Москва: Изд. стандартов, 1979. – 2 с.

57. ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования; введ. 24.05.2001. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002 – 8 с.

58. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] – Взамен ГОСТ Р 54149-2010; введ. 22.07.2013 М.: Стандартиформ, 2014 – 19 с.

59. ГОСТ 3306-88. Сетки с квадратными ячейками из стальной рифленой проволоки. Технические условия [Текст] – Взамен ГОСТ 3306-70; введ. 01.01.1990. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 – 7 с.

60. ГОСТ 427-75. Линейки измерительные металлические. Технические условия; введ. 01.01.1975. - М.: Стандартиформ, 2006. – 7 с.

61. ГОСТ 5378-88. Угломеры с нониусом. Технические условия [Текст] – Взамен ИУС 1-1989; введ. 17.10.1988. - Москва : Изд. стандартов – 8 с.

62. Добронравов С.С. Строительные машины / С.С. Добронравов, В.П. Сергеев // Учеб. пособие для вузов, 2-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. школа. - 1981, - 320 с.

63. Иванов К.С. Возможный подход к моделированию процесса грохочения и метод автоматической оптимизации параметров грохота // Труды конференции НТФР. 2011. – Санкт-Петербург.

64. Иванов К.С. Виброударное перемещение сыпучих сред и деформируемых тел – приложение к моделированию и оптимизации процесса ситовой классификации: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 : защищена 26.12.13 /

Иванов Кирилл Сергеевич. – Санкт-Петербург. 2013. 148 с.: ил.

65. Иванов К.С., Устинов И.Д. Вибрационная сортировка: Математическое моделирование // Маркшейдерия и недропользование. 2013. №3. С. 45-46.

66. Иванов К.С., Карапетян К.Г., Устинов И.Д. Влияние факторов вещественного состава сырья на показатели вибрационного грохочения // Маркшейдерия и недропользование. 2013. №2. С. 25-27.

67. Изойтко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. - СПб.: Наука. 1997. – 582 с.

68. Картавый А.Н. Ресурсосберегающие принципы конструирования технологических вибрационных машин // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №3. С. 28-37.

69. Коровников А.Н., Трофимов В.А., Балдаева Т.М. Интенсификация грохочения сыпучих материалов // Материалы XXIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады. Издательство «Форт Диалог-Исеть». Екатеринбург. 2018. С. 30-33.

70. Краснов А.А. Сегрегация зернистого материала при сдвиговой деформации слоя // Исследование процессов, машин и аппаратов разделения материалов по крупности / Труды института «Механобр». Л., 1988. С. 50-64.

71. Кремер Е.Б., Палилов В.Ф., Шифрина Е.Б. Поведение сыпучего материала в вибрирующих сообщающихся сосудах // Сб. научн. трудов. Новые направления переработки сырья и регенерации отходов производства. – Л.: Механобр, 1986. С. 31-44.

72. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 5. Статистическая физика, ч. 1. Изд. 5-е, стереотип. М.: Физматлит, 2002. 613 с.

73. Левенсон Л.Б. Машины для обогащения полезных ископаемых: Плоские подвиж. грохота, их теория, расчет и проектирование. — Л.: Механобр, 1924. — 240 с. — (Тр. Ин-та мех. обработки полез. ископаемых; Вып.1).

74. Лиандов К.К. Грохочение полезных ископаемых. Л.: Metallurgizdat. 1948. – 158 с.

75. Липовский М.И. Об одном виде вибрационного перемещения сыпучей среды // Изв. АН СССР, МТТ. – 1969. – №3, С. 6-9.
76. Мамонов С.В. Современное техническое состояние и технологические возможности тонкого грохочения в обогащении руд цветных металлов / С.В. Мамонов, Г.И. Газалеева // Известия вузов. Горный журнал. 2013. №6. С. 139-146.
77. Миловский А.В., Кононов О.В. Минералогия. – М.: Наука, 1982, 312 с.
78. Минералогический справочник технолога-обогапителя / Б.Ф. Куликов, В.В. Зуев, И.А. Вайншенкер, Г.А. Митенков - Л.: Недра, 1985, 264 с.
79. Нагаев Р.Ф. Периодические режимы вибрационного перемещения. Москва: Наука. 1978. 160 с.
80. Непомнящий Е.А. Математическое описание кинетики процесса сепарации сыпучих материалов. Труды ВНИИЗ. М., 1967. Вып. 61–62. С. 59–66.
81. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. Монография. - Москва: Наука, 1978. - 336 с.
82. Огурцов В.А. Процессы грохочения сыпучих строительных материалов: моделирование, расчет и оптимизация: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 : защищена 05.03.10 / Огурцов Валерий Альбертович. – Иваново. 2010. 303 с.
83. Олевский В.А. Кинематика грохотов. Л.; М.: ГНТИ, 1941. Ч. I, II. 156 с.
84. Островский Г.М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука, 2000. - 359 с.
85. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976, 300 с.
86. Пат. 139262 Российская Федерация, МПК В07В 1/40 (2006.01). Вибрационный грохот [Текст] / Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Иванов К.С.; патентообладатель НПК «Механобр-техника» (ЗАО) - №2013141902/03; заявл.11.09.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 10. – 2 с. : ил.
87. Пат. 164464 Российская Федерация, МПК В07В 1/40 (2006.01). Вибрационный грохот [Текст] / Вайсберг Л.А., Балдаева Т.М., Иванов К.С., Коровников А.Н., Котова Е.Л., Трофимов В.А., Устинов И.Д.; патентообладатель

НПК «Механобр-техника» (ЗАО) - №2016106233/03; заявл.24.02.2016; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 2 с. : ил.

88. Пат. 187226 Российская Федерация, МПК G01B 5/24 (2006.01), G01N 33/24 (2006.01), G01N 19/00 (2006.01). Устройство для измерения угла естественного откоса сыпучего материала [Текст] / Вайсберг Л.А., Балдаева Т.М., Герасимов А.М., Иванов К.С., Лазарева В.В., Устинов И.Д.; патентообладатель НПК «Механобр-техника» (ЗАО) - №2018137328; заявл.22.10.2018; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 6. – 11 с. : ил.

89. Пат. 2407600 Российская Федерация, МПК B07B 1/40 (2006.01), B07B 13/00 (2006.01). Вибрационный классификатор [Текст] / Арсентьев В.А., Блехман И.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Блехман Л.И., Трофимов В.А., Якимова К.С.; патентообладатель НПК «Механобр-техника» (ОАО) - №2009130426/03; заявл.07.08.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36. – 10 с. : ил.

90. Пат. 2616042 Российская Федерация, МПК B07B 1/40 (2006.01), B07B 1/46 (2006.01). Вибрационный грохот [Текст] / Вайсберг Л.А., Балдаева Т.М., Иванов К.С., Коровников А.Н., Трофимов В.А., Устинов И.Д.; патентообладатель НПК «Механобр-техника» (ЗАО) - №2016104980; заявл.15.02.2016; опубл. 12.04.2017, Бюл. № 11. – 12 с. : ил.

91. Пелевин А.Е. Вероятность прохождения частиц через сито и процесс сегрегации на вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2011. №1. С. 119-129.

92. Пелевин А.Е. Динамика движения твёрдых фаз при гидравлическом вибрационном грохочении // Известия вузов. Горный журнал. 2011. №4. С. 127-135.

93. Пелевин А.Е. Научные основы процесса тонкого гидравлического вибрационного грохочения и разработка новых схем обогащения магнетитовых руд: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.13 : защищена 20.10.11 / Пелевин Алексей Евгеньевич. – Екатеринбург. 2011. 302 с.: ил.

94. Пелевин А.Е. Математическая модель разделения по крупности на гидравлическом вибрационном грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2011. №2. С. 87-96.

95. Пелевин А.Е. Сепарационная характеристика грохота // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2011. №2. С. 45-48.

96. Пелевин А.Е., Сытых Н.А. Эффективность разделения по крупности в вибрационном гидравлическом грохоте // Известия вузов. Горный журнал. 2010. №6. С. 85-90.

97. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение, грохочение полезных ископаемых, М.: Недра. 1990. – 300 с.

98. Плисс Д.А., Абрамович И.М. Разработка вибрационного способа сухой классификации полезных ископаемых // Отчет ВНИИ Механобр. – Л.: Механобр, 1948.

99. Разумов К.А, Перов В.А. Проектирование обогатительных фабрик: Учебник для вузов / - 4-е изд., перераб. и доп.. Недра, Москва, 1982. – 260 с.

100. Ромашев А.О. Интенсификация процесса классификации сыпучего материала в условиях вибрационной сегрегации: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13 : защищена 05.06.12 / Ромашев Артем Олегович. – Санкт-Петербург. 2012. 169 с.: ил.

101. Сайт компании Aury Australia Pty Ltd. Banana Screens [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.auryaustralia.com.au/equipment> – Заглавие с экрана. - (Дата обращения: 21.03.2019 г.)

102. Сайт компании Binder+Co AG. Result Product Finder [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.binder-co.com/1305/?IndustrienID=&AufbereitungsartenID=3> – Заглавие с экрана. - (Дата обращения: 07.12.2018 г.)

103. Сайт компании Binder+Co AG. Resonance screens [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.binder-co.com/1124/Resonance-Screens#Basic-Info> – Заглавие с экрана. - (Дата обращения: 30.01.2019 г.)

104. Сайт компании Kroosh Technologies Ltd. Грохот ULS1506.12I. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://kroosh.com/ru/products/grohot-uls150612i>. – Заглавие с экрана. - (Дата обращения: 30.01.2019 г.)

105. Сайт НПК «Механобр-техника» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://mtspb.com/grohoti\\_vibratsionnie\\_i\\_gidravlicheskie/](http://mtspb.com/grohoti_vibratsionnie_i_gidravlicheskie/) – Заглавие с

экрана. - (Дата обращения: 20.11.2018 г.)

106. Смоловик В.А., Росляк А.Т. Влияние основных свойств сыпучих материалов на характеристики низкоскоростного пневмотранспорта, Теоретические основы химической технологии. 2007. Т.41. №6. С. 630-633.

107. Справочник по обогащению руд, т.1 Подготовительные процессы / под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1982, 367 с.

108. Универсальный вибрационный стенд: опыт использования в исследованиях, некоторые результаты / И.И. Блехман, Л.А. Вайсберг, Б.П. Лавров, В.Б. Васильков, К.С. Якимова // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2003. №3. С. 224–227.

109. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов, М.: Химия, 1988. 256 с.: рис.,табл. - Библиогр.: с.250-256 (197 назв.).

110. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков, М.: Химия, 1992. 252 с.: ил. – Библиогр.: С. 247-252 (249 назв.).

111. Устинов И.Д., Балдаева Т.М. Вибрационная классификация по крупности. Термодинамическая модель // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». Санкт-Петербург. 2018. №1 С. 12-16.

112. Устинов И.Д., Балдаева Т.М. Новые вибрационные грохоты для золоторудной промышленности // Золотодобывающая промышленность. Москва. 2017. №4 (82) С. 64-65.

113. Устинов И.Д., Балдаева Т.М. Новые технологии и оборудование для грохочения золотосодержащих руд // Золотодобывающая промышленность. Москва. 2018. №1 (85) С. 20-21.

114. Учитель А.Д. К анализу процесса сегрегации сыпучих материалов на вибрационных грохотах // Исследование процессов, машин и аппаратов разделения материалов по крупности / Труды института «Механобр». Л., 1988. С. 71-80.

115. Федотов К.В., Никольская Н.И. Проектирование обогатительных фабрик, М.: Горная книга. 2012. – 366 с.

116. Феоктистов А.Ю., Каменецкий А.А., Блехман Л.И., Васильков В.Б., Скрыбин И.Н., Иванов К.С. Применение метода дискретных элементов для



моделирования процессов в горнометаллургической промышленности // Записки Горного института. 2011. С. 145-149.

117. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава // Научно-технический журнал «Горный информационно-аналитический бюллетень». М.: Издательство: «Горная книга». 2009. Отдельный выпуск №15. С. 9-25.

118. Челомей В.Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями. Доклады Академии Наук СССР. Механика 1983. т. 270, 1. С. 62-67.

119. Шишкин Е.В., Казаков С.В. Динамика колебательной системы вибрационного устройства с пространственными движениями рабочих органов для дезинтеграции особопрочных материалов // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2017. №5. С. 48-53.

120. Шишкин Е.В., Сафронов А.Н. Динамика вибрационной щековой дробилки с учетом влияния технологической нагрузки // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2016. №6. С. 39-43.

121. Юшина Т.И., Кукин А.В. Дробление вскрышных пород с целью производства щебня // ООО «Геомар Недра». Журнал «Маркшейдерия и недропользование». Москва. 2012. №1 (57) С. 17-19.

122. Юшина Т.И., Петров И.М., Черный С.А. Об экспорте концентратов обогащения и необходимости их глубокой переработки в России // Издательский дом «Руда и Металлы». Журнал «Обогащение руд». 2018. №6 (378). С. 52-57.

123. A.Kudrolli. Size separation in vibrated granular matter. Rep. Prog. Phys. 67 (2004) pp. 209–247.

124. Baldaeva T.M. Efficiency of step fine sizing (screening) // Proceeding of the conference of young scientists and specialists with international participation - SPb.: REC «Mekhanobr-Tekhnika». 2018. pp. 55-62.

125. Baldaeva T.M. Sizing efficiency of fine size fractions in vibrating screening. // XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical issues of rational use of natural resources». Saint-Petersburg. 2019. p. 21.

126. Barksdale R.D. The Aggregate Handbook // Nation. Stone Acc.. W. 2007.

PP. 630.

127. Barry A. Wills, Tim Napier-Munn. Mineral Processing Technology. Elsevier Science & Technology Books, 2006, 450 p.

128. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979, №29, pp. 47-65.

129. Dong Hailin, Liu Chusheng, Zhao Yuemin, Zhao Lala. Influence of vibration mode on the screening process, *International Journal of Mining Science and Technology*, №1, 2013 pp. 95-98.

130. Ferrara G., Preti U., Schena G.D. Modelling of screening operations. *Intern. J. of Mineral Processing*. 22, 1-4, 1988, pp. 193-222.

131. Haishen Jiang, Yemin Zhao, Chenlong Duan. Dynamic characteristics of an equal-thickness screen with a variable amplitude and screening analysis. *Powder Technology* 311 (2017) pp. 239-246.

132. Ivanov K.S. Modeling and optimization of vibrational screening process // *Proceedings of the XXXIX International Summer School Conference APM 2011*. – St. Petersburg (Repino), July 1-5, 2011. pp. 213-218.

133. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. Granular solids, liquids, and gases. *Rev. of Mod. Phys.*, 1996, Vol.68, №4, pp. 1259-1273.

134. Jean-Philippe Bouchaud, Philippe Claudin, Dov Levine, and Matthias Otto. Force chain splitting in granular materials: a mechanism for large scale pseudo-elastic behaviour, 2000 *Eur. Phys. J. E* 4., pp. 451-457.

135. Jens Eggers. Sand as Maxwell's demon, *Phys. Rev. Lett.* 83, 1999, pp. 5322-5325.

136. Khalil N., Garzo V., Santos A. Hydrodynamic Burnett equations for Maxwell models of granular gas // *Phys. Rev.* 2014. E89. pp. 052201-1 - 052201-14.

137. Kremer G.M., Santos A., Garzo V. Transport coefficients of granular gas of inelastic rough hard spheres // *Phys. Rev.* 2014. E90. pp. 022205-1 - 022205-16.

138. Lala Z., Chusheng L., Junxia Y. A virtual experiment showing single particle motion on a linearly vibrating screen-deck // *Mining Science and Technology*. 2010. 20. pp. 0276-0280.

139. Lala Zhao, Chusheng Liu, Yuemin Zhao, Guangyan Xie, Chenlong Duan. Numerical simulation of the screening process with an elliptical vibration motion using 3D-DEM // Materials of XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC 2014), 2014, chapter 16 (classification, screening and sorting), pp. 76-85.
140. Metso. Crushing and screening solutions. Brochure №2973-02-17-AGG/Tampere-English. 2017. Finland. p. 80.
141. Milan Trumic, Nedeljko Magdalinovic. New model of screening kinetics // Minerals Engineering 24 (2011), pp. 42-49
142. Pastenes J.C., Geminard J.-C., Melo F. Interstitial gas effect on vibrated granular columns // Phys. Rev. 2014. E89, pp. 062205-1 - 062205-6.
143. Risso D., Soto R., Godoy S., Cordero P. Friction and convection in a vertically vibrated granular system // Phys. Rev. E 72 (2005), pp. 011305-1 - 011305-6.
144. Rongali R., Alam M. Higher-order effects on orientational correlation and relaxation dynamics in homogeneous cooling of a rough granular gas // Phys. Rev. 2014. E89. pp. 062201-1 - 062201-13.
145. Taggart A.F. Handbook of mineral dressing – NY: J.Wiley & Sons, 1945 – pp. 7-50.
146. Tomasz Dyr, Piotr Wodzinski. Model particle velocity on a vibrating surface // Physicochemical Problems of Mineral Processing, 35, 2002, pp. 147-157.
147. Wang Guifeng, Tong Xin. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation // Mining Science and Technology (China) 21 (2011), pp. 451-455.
148. Williams J.R. The Theoretical Basis of the Discrete Element Method / J.R. Williams, G. Hocking, G.G.W. Mustoe // NUMETA 1985, Numerical Methods of Engineering, Theory and Applications, A.A. Balkema, Rotterdam, January 1985, pp. 897-906.
149. Williams J.R., O'Connor R. Discrete element simulation and the contact problem // Archives of Computational Methods in Engineering. 1999. Vol. 6, Iss. 4. pp. 279-304.
150. Xiao Jianzhang, Tong Xin. Particle stratification and penetration of a linear

vibrating screen by the discrete element method // *International Journal of Mining Science and Technology*, 22 (2012), pp. 357-362.

151. Zhao Lala, Zhao Yuemin, Liu Chusheng, Li Jun, Dong Hailin. Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // *Mining Science and Technology (China)*, vol.21, 2011, pp. 677-680.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Справка о внедрении результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор  
ФНЦ «Механобр-техника» (АО)

Т.А. Кутахов

«11» 01 2019 2019 г.

### СПРАВКА

о внедрении результатов диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Балдаевой Татьяны Михайловны

Комиссия рассмотрела результаты использования в деятельности НПК «Механобр-техника» (АО) данных диссертационного исследования Балдаевой Т.М. на тему «Повышение эффективности вибрационного грохочения на основе моделирования технологических закономерностей», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, и установила следующее:

1. Результаты исследований, выполненных Т.М. Балдаевой в ходе изучения закономерности вибрационного грохочения, внедрены при разработке технологии градиентного грохочения сыпучих материалов, а также использованы при конструировании соответствующих вибрационных классифицирующих машин.
2. Методические разработки Т.М. Балдаевой внедрены при создании способа и лабораторного устройства для измерения углов естественного откоса сыпучих материалов и расчетов коэффициентов их внутреннего трения.

Председатель комиссии,  
руководитель НОЦ, д.х.н.

И.Д. Устинов

Главный научный сотрудник, д.т.н.

В.А. Арсентьев

Директор по координации НИР

А.Л. Соболев