

На правах рукописи



БАЛДАЕВА Татьяна Михайловна

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

*Специальность 25.00.13 – Обогащение полезных
ископаемых*

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель –

доктор технических наук, профессор, академик РАН

Вайсберг Леонид Абрамович

Официальные оппоненты:

Газалева Галина Ивановна

доктор технических наук, ОАО «Уралмеханобр», отдел рудоподготовки и специальных методов исследования, заведующий.

Шишкин Евгений Витальевич

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра механики, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Защита диссертации состоится 21 ноября 2019 г. в 12 ч 30 мин на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 06 сентября 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БОДУЭН
Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 исследований:

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:

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

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

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

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

– 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 тонко-вкрапленных 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, сходимость 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 «Механобр-техника» 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении поставлены задачи исследования, представлена актуальность работы, сформулированы цель и основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов.

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 вибрационного грохочения (ВГ).

Во второй главе 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 отражены экспериментальные исследования, включающие сравнительные полупромышленные испытания грохотов с разной траекторией колебаний на минеральном сырье с различными физическими свойствами, предварительный отсев мелких классов материала, а также исследование технологии «градиентного» ВГ на ситах сложной формы.

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

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ 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.

Физические свойства твердого сыпучего минерального сырья оказывают огромное влияние на процесс вибрационного грохочения и, соответственно, на его эффективность. Как известно, вибрационное грохочение – «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.

Выполненные технологические испытания состоят из двух блоков – замеров ключевых физико-механических свойств образцов в процессе изменения (закрупнения) гранулометрического состава и собственно исследования процесса вибрационного грохочения при варьировании частоты вибрации короба грохота для трёх грохотов с разным типом движения короба. Экспериментальному изучению подвергнута частота колебаний как доминирующий параметр вибрационного грохочения. В Таблице 1 приведены физические свойства объектов.

Таблица 1 - Физические свойства минеральных объектов

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

Для измерения углов естественного откоса сыпучих материалов было сконструировано и изготовлено усовершенствованное устройство (Патент РФ № 187226 от 25.02.2019 г.).

Далее испытания проводили в непрерывном режиме на грохотах с прямоугольными ситами площадью 0,5 м² 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°. Полная амплитуда колебаний – 4 мм. Грохочение проводили при удельной нагрузке 0,52-0,55 т/м², просеивающая поверхность была во всех случаях идентичной – с квадратными ячейками со стороной 1,6 мм. 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. Сравнительная эффективность грохочения по классу -1,6 мм приведена в Таблице 2.

Таблица 2 - 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 |

В результате установлено, 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. Для каменного угля: орбитальными в вертикальной плоскости – прямолинейными в горизонтальной плоскости – орбитальными в горизонтальной плоскости.

Дальнейшую интенсификацию процесса вибрационного грохочения 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.

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

Наиболее универсальной моделью, описывающей вибрационное грохочение сыпучего материала, является модель Вайсберга-Рубисова. В ней рассматривается толстый слой кускового сыпучего материала, транспортируемого с постоянной скоростью по просеивающей поверхности.

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

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

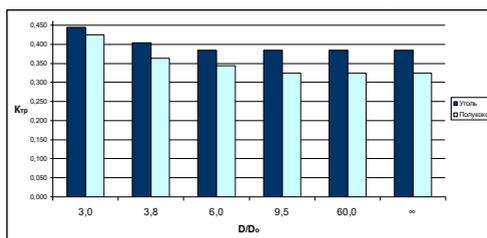
где ε_d – извлечение в подрешетный продукт узкого класса D , d_0 – размер отверстия (для щелевидных отверстий – наименьший размер), $\psi = 1$ для щелевидных отверстий, $\psi = 2$ для квадратных отверстий, φ – живое сечение сита, u – нормальная к сити составляющая скорости частиц при их попадании в отверстие,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

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 этот подход натурными экспериментами. Поэтому в рамках настоящей работы на базе теории Вайсберга-Рубисова и ее дополнений был рассмотрен следующий подход.

Существует 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 сити и скорости транспортирования материала мелких классов сквозь прилегающий к сити слой и собственно сито.

С повышением однородности материала над плоским ситом понижается плотность упаковки материала в прилегающем слое (в кгс/м²) и увеличивается мера упорядоченности материала в объеме. Для подтверждения указанных предположений проведены исследования на примере влияния различных модификаций угля на эффективность его вибрационного грохочения. 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 1. Значение ∞ отвечает случаю скольжения пробной частицы по стальной полированной поверхности.



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

Рисунок 1 - Зависимость условного коэффициента трения скольжения от соотношения D/D_0

Из приведенных данных следует, что с увеличением размера частиц угля и полукокса условный коэффициент трения о поверхность сита уменьшается и при $D/D_0 > 6$ 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_0 и закономерно происходит некоторое увеличение скорости транспортировки крупных частиц по сити в сторону разгрузки.

Кроме определения коэффициента внутреннего трения, реологические свойства угля и полукокса изучали путем измерения текучести материала различных классов крупности, а также неклассифицированного материала крупностью $-2,5+0$ мм. Изучение текучести проводилось при 20 °С с помощью вискозиметра свободного истечения с прозрачной цилиндрической частью диаметром 65 мм и

соплом истечения диаметром 15 мм. Эффективная вязкость сыпучего материала определялась как отношение времени истечения исследуемого материала к времени истечения воды того же объема (градусы Энглера, °E). Измеренная эффективная вязкость не является константой, однако позволяет оценить тенденцию изменения реологических свойств сыпучего материала в зависимости от его физического состояния. Из-за пристенного эффекта провести замеры эффективной вязкости материала крупнее 2,5 мм на том же вискозиметре не представлялось возможным. Установлено, что эффективная вязкость узких фракций крупности угля и полукокса близка к вязкости воды (Рисунки 2 и 3). 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 отсутствовало 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.

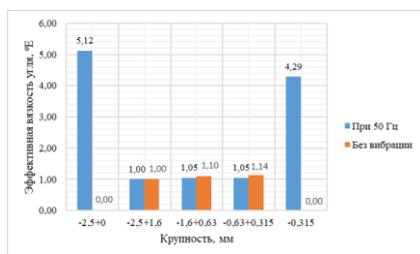


Рисунок 2 - Эффективная вязкость (°E) различных фракций крупности каменного угля с виброинициацией и без нее

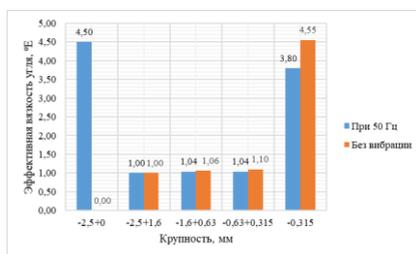


Рисунок 3 - Эффективная вязкость (°E) различных фракций крупности полукокса с виброинициацией и без нее

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 4-5 раз превышает вязкость узких фракций крупности. В целом эффективная вязкость сыпучего полукокса ниже вязкости исходного сыпучего угля.

Исходя из вышесказанного, была выявлена закономерность уменьшения коэффициента эффективной вязкости сыпучего материала при упорядочивании гранулометрического состава как при свободном

истечении, так и при вибрационной инициации. Данное обстоятельство очевидным образом способствует скорости прохождения гранулярного материала сквозь сито. Формируется вывод, что если направленно упорядочить гранулометрический состав классифицируемого материала, то можно повысить эффективность его вибрационного разделения по крупности. Из этого следует, например, предварительно отсечь некоторое количество мелкой фракции, то есть осуществить грохочение «от мелкого класса к крупному».

Практический интерес представляет использование так называемого эффекта «градиентного» грохочения. Для этого необходимо проведение исследования предварительного выделения мелких классов для сырья с низкой удельной и насыпной плотностью, грохочение которого проходит в толстом слое материала, факторы такой смеси и ее сегрегации оказывают сильное влияние на эффективность грохочения.

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.

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.

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). При этом скорость классификации угля за счет его большой подвижности оказалась высокой – выход основной массы мелкого класса достигался менее чем за две минуты.

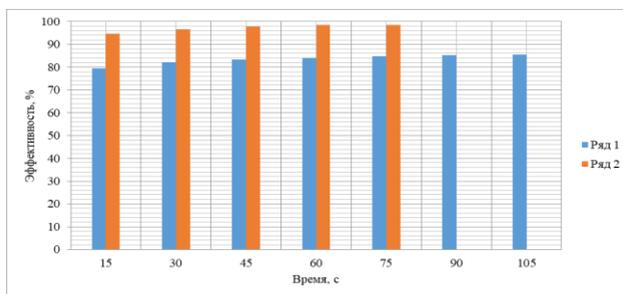


Рисунок 4 - Кинетика классификации угля (эффективность по классу 2,5 мм на сите с отверстиями 2,5 мм (ряд 1) и последовательно на ситах 2,0 и 2,5 мм (ряд 2))

Объяснением полученных результатов является различие свойств сыпучего материала (каменного угля) полидисперсного состава и материала, из которого удалена значительная часть тонкой фракции (Таблица 3).

Таблица 3 - 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 ³ | | 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 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.

Полученные данные по эффективности последовательной классификации не относятся исключительно к углю. Так, были проведены опыты последовательного тонкого сухого грохочения мелкодробленной 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 %. Однако, такой подход представляет практический интерес в первую очередь для классификации легких полезных ископаемых, грохочение которых проводят исключительно в толстом слое материала. Приведенные выше результаты исследований

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

Дальнейшие исследования проводились на двух различных просеивающих поверхностях. Просеивающая поверхность №1 – плоская стальная с круглыми ячейками диаметром 4 мм, размер поверхности (ДхШ): 950х120 мм, площадь просеивающей поверхности: 0,114 м². Просеивающая поверхность №2 – трапецидальная стальная с круглыми ячейками, 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 м² (Рисунок 5).

Эффективные площади просеивающих поверхностей №1 и №2 в горизонтальной проекции равны и составляют 0,114 м². Параметры грохочения: угол наклона короба грохота 17 град., амплитуда колебаний 3 мм, частота 16,7 с⁻¹, виброускорение 33,0 м/с² или 3,4G. Дозирование осуществлялось с помощью вибрационного питателя. Контроль загрузки питания проводился по медиане трапецидального 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·м²). При грохочении на трапецидальном сите №2 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·м²). 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.

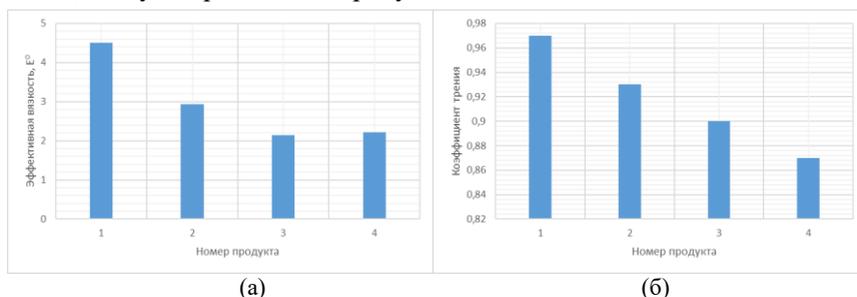


Рисунок 5 - Сита сложной формы

Таблица 4 - 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 6. 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 6 - Реологические свойства продуктов классификации угля

Из приведенных экспериментальных данных серии стендовых испытаний следует, что суммарная эффективность сухого вибрационного грохочения 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. 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 – это более подвижный сыпучий материал, легче проходящий через просеивающие поверхности.

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 грохотов.

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. Суммарный дисконтированный экономический эффект для углеобогатительного предприятия средней мощности около 1,9 млн руб. 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 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 углеобогательного предприятия средней мощности. Суммарный дисконтированный экономический эффект для углеобогательного 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.

Основные публикации в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. **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.

2. 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». Санкт-Петербург. 2016. №1 С. 3-9.

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

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

5. 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.

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

Патенты:

7. 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.

8. Пат. 187226 Российская Федерация, МПК G01В 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.

9. Пат. 2616042 Российская Федерация, МПК В07В 1/40 (2006.01), В07В 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.