

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



На правах рукописи

ЛЕВЧЕНКО ЭДУАРД ПЕТРОВИЧ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ В ДИСКОВЫХ
ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ
КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ**

Специальность 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание учёной степени
доктора технических наук

Алчевск — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Научный консультант:

Вишневский Дмитрий Александрович
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет», ректор

Официальные оппоненты:

Снитко Сергей Александрович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением»

Богданов Василий Степанович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», заведующий кафедрой механического оборудования

Никитин Александр Григорьевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» профессор кафедры механики и машиностроения

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», г. Луганск

Защита состоится «01» декабря 2023 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 при ФГБОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» по адресу: 294204, ЛНР, Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал, тел. +7 (85742) 2-60-43, e-mail: info@dstu.education.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» в читальном зале по адресу: 294204, ЛНР, Алчевск, ул. Ленинградская, 45а, тел. +7 (85742) 5-19-12, library@dstu.education.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 001.007.01



кандидат технических наук, доцент
Евгений Сергеевич Смекалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сложившаяся современная динамика устойчивого развития металлургической отрасли и машиностроения все большее предпочтение отдаёт совершенствованию и внедрению новых технологий, характеризующихся повышенной концентрацией воздействия на перерабатываемые материалы. Следовательно, создание более рациональных условий переработки металлургического сырья и отходов, требует разработки современных конструкций дробильно-измельчительных машин (ДИМ).

Если ранее конструирование и разработка ДИМ были направлены на обеспечение приоритетного воздействия на материал какого-либо преимущественно одного способа разрушения, то на современном уровне развития техники все большее внимание уделяется созданию условий комбинированного воздействия, что сокращает парк применяемого оборудования и приводит к более рациональным условиям сокращения энергозатрат на переработку сырья.

На процессы дробления и измельчения материалов в мировой промышленности расходуется около 10 % всей вырабатываемой электроэнергии, что сказывается не только на материальных затратах на производство, но и вносит существенный вклад в глобальное потепление, что признано мировой общественностью очень серьёзной проблемой техногенного развития человеческой цивилизации.

Обычно для известных и широко применяемых типов дробилок и измельчителей степень дробления, представляющая собой отношение крупности исходного материала к крупности готового продукта, в среднем составляет около 50 и в единичных случаях практически не превышает 100. Поэтому для её снижения требуется применение целого ряда машин самого различного принципа действия. Условно принято считать, что дробление осуществляется, если готовый продукт имеет крупность более 5 мм, поэтому если размеры частиц на выходе из машины достигают менее 5 мм, то это характеризуется как процесс измельчения.

В дисковых измельчителях, ввиду преимущественного наложения усилий трения на материал, затраты энергии на разрушение сырья достигают максимальных значений (70-100 и более кВтч/т), что является основным фактором сдерживания их широкого распространения. Одним из способов повышения эффективности выступает замена истирания на другие менее энергоёмкие способы разрушения (срез, удар, излом и др.). Это реализуется в ДИМ комбинированного действия, где при переработке каменных материалов энергозатраты составляют от 3 до 10-12 кВтч/т

ДИМ комбинированного действия за счёт совмещения в одной конструкции по сути нескольких (как правило, двух и более) различных способов наложения разрушающих усилий на материал объединяют в себе несколько классов разных машин, что позволяет успешно сочетать предварительное дробление, обеспечиваемое более эффективным процессом разрушения и окончательное калибрование материала, т.е. измельчение. Так как в процессе производства на металлургическом предприятии накапливается большое количество лома огнеупоров, металлургических шлаков, а также требуется фракционная подготовка извести, железной руды и другого сырья, оно может успешно подвергаться помолу на порошки при комбинированном воздействии разрушающих усилий.

Совершенствование конструкций, методов исследования и проектирования ДИМ комбинированного действия на материал обеспечивает повышение технического уровня дробильного и измельчительного оборудования по диапазону частоты вращения, производительности, энергозатратам и качеству фракционного состава готового продукта. Её достижение позволит проектировать ДИМ с режимными параметрами работы для более эффективной реализации комбинированных методов диспергирования материалов за счёт совмещения в одном устройстве нескольких различных машин.

При анализе и синтезе ДИМ комбинированного действия наиболее сложными и взаимосвязанными научно-техническими задачами являются теоретическое обоснование процессов работы, обеспечение заданной производительности, создание методов расчёта и влияние геометрической формы рабочих органов на выход готового продукта. Для комплексного решения данных задач ДИМ изначально проектируются и исследуются как единый объект, включающий рабочую камеру, привод и рабочие органы для создания комбинированных разрушающих нагрузок на материал. Разработаны принципы организации геометрической формы рабочих органов, что реализовано в создании новой конструкции ДИМ, использующей комбинированные виды воздействия на материал путём организации преимущественно удара, раздавливания и среза с окончательным формированием необходимого фракционного состава готового продукта истиранием при выходе через кольцевую щель.

Степень разработанности темы. Существующие теоретические и экспериментальные подходы к проектированию дробильных и измельчительных машин характеризуются высокой степенью преимущественно какого-либо одного способа разрушения материала. Поэтому такое оборудование характеризуется относительно низкой степенью дробления (измельчения), а технологические процессы получения

требуемой крупности готового продукта требуют многостадийности с применением большого парка оборудования, что увеличивает номенклатуру оборудования и затраты электроэнергии на его использование. Поэтому в данной работе изначально дробящая и измельчительная машина рассматривается в виде единого объекта, в котором совмещены эти обе функции, а одним из путей решения комплексной задачи комбинированного разрушения материала выступает геометрическая форма рабочих органов, позволяющая в вертикальной плоскости осуществлять процессы дробления, а в горизонтальной — измельчения одними и теми же рабочими органами, скомпонованными в единой конструкции. Кроме того, существующие методы анализа и синтеза для условий комбинированного воздействия на материал не получили взаимосвязанного обобщения, систематизации и исследований.

Разработке научных основ диспергирования металлургического сырья и отходов в ДИМ комбинированного действия в металлургической отрасли практически внимания не уделялось. Однако некоторые предпосылки отслеживаются с середины 80-х годов прошлого века, когда, например, в типовых конструкциях дисковых мельниц начинают делаться отдельные немногочисленные попытки совмещения различных принципов наложения усилий в общей рабочей камере машины (В.Н. Алтухов, А.М. Зинченко, П.П. Королев, А.И. Пологович, А.И. Свеженец, А.Н. Тумин, В.В. Щербак и др.). Однако такой разрозненный подход не даёт возможности в достаточной степени оценить теоретические и практические аспекты исследуемой проблемы, не позволяет в обоснованном виде осуществлять расчёт параметров ДИМ действия и разрабатывать их рациональные конструкции. Теоретическим и практическим исследованиям процессов диспергирования в на основе комбинированного действия на материал внимания почти не уделялось, в основном рассматривались лишь вопросы совершенствования конструкции. Методы расчёта производительности энергозатрат таких машин практически отсутствуют.

Объект исследования — процессы дробления и измельчения металлургического сырья и отходов в дробильно-измельчительных машинах комбинированного действия и оборудование для их реализации.

Предмет исследования — конструкция дробильно-измельчительной машины комбинированного действия и основные энергосиловые и технологические параметры реализации процессов дробления и измельчения металлургического сырья и отходов.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является создание научных основ диспергирования металлургического сырья и отходов в ДИМ комбинированного действия путём обоснования рациональных условий разрушения, позволяющих эффективно совмещать

процессы дробления и измельчения в единой машине. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи исследований.

1. Выполнить научный анализ состояния научно-технической проблемы дробления и измельчения материалов с учётом комбинированного воздействия на материал в дисковых измельчителях.

2. Выполнить синтез принципиально новых способов и устройств для создания условий комбинированного воздействия на материал за счёт создания условий его наилучшего разрушения.

3. Провести теоретические и экспериментальные исследования процесса комбинированного диспергирования металлургического сырья и отходов в ДИМ комбинированного действия в лабораторных и производственных условиях.

4. Создать методы расчёта конструктивных особенностей, условий подачи материала и энергозатрат по требуемой производительности для обоснования мощности электродвигателя ДИМ комбинированного действия на материал.

5. Выполнить экспериментальные исследования и проверку конструктивно-технологических параметров (производительности, энергозатрат, фракционного состава готового продукта) ДИМ комбинированного действия для металлургического сырья и отходов производства.

6. Провести испытания ДИМ комбинированного действия в производственных условиях по переработке металлургического сырья и отходов.

7. Оценить экономическую эффективность и внедрить ДИМ комбинированного действия в металлургическое производство.

Научная новизна.

1. Впервые предложена классификация ДИМ по приоритетному способу наложения усилий, условиям подачи сырья, количеству подвижных дисков, частоте вращения дисков, расположению осей вращения, количеству щелей и конструкции дисков, согласно которой дисковые ДИМ комбинированного действия, сочетающие в себе процессы разрушения материалов сдвигом и истиранием, рассматриваются как отдельный класс.

2. Уточнён процесс подачи материала в ДИМ комбинированного действия с учётом траектории его движения, геометрических параметров машины и исходного сырья.

3. Впервые обоснована зависимость частоты вращения диска от радиуса вращения при подаче материала в зону дробления при ударе о боковые поверхности рабочего органа.

4. Впервые получена зависимость угловой скорости вращения рабочего органа от его размера для обеспечения благоприятных условий выгрузки из щелевого зазора не защемлённых частиц.

5. Впервые для ДИМ комбинированного действия разработан метод определения производительности в зависимости от пропускной способности щелевого зазора, радиуса диска от радиального расположения на нём куска материала и геометрических параметров измельчаемого материала и диска.

6. Впервые создан метод расчёта энергосиловых параметров однощелевой ДИМ комбинированного действия, учитывающий суммарное действие ударных нагрузок вертикально движущимся потоком исходного материала, сопротивление скручиванию материала в центре камеры измельчения, сопротивление измельчению в дробяще-измельчительных полостях, сопротивление трению в щелевом зазоре и сопротивление разгрузочных скребков.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Предложенная классификация ДИМ комбинированного действия содействует эмпирическому накоплению знаний до уровня теоретического синтеза и прогнозам развития новых конструкций таких машин.

2. Теоретически обоснованные параметры загрузки сырья в рабочее пространство ДИМ комбинированного действия, обеспечивающие его попадание непосредственно в зону дробления, позволили согласовать геометрические и технологические параметры загрузочного устройства и ДИМ для эффективного разрушения материала.

3. Полученная зависимость частоты вращения диска от радиуса вращения при подаче материала в зону дробления при ударе о боковые поверхности рабочего органа позволила рассчитать режимы и геометрические размеры диска для снижения затрат энергии на транспортировку сырья по его поверхности диска от центра до разрушающего взаимодействия с рабочими органами.

4. Полученная зависимость угловой скорости вращения рабочего органа от его размера для обеспечения благоприятных условий выгрузки из щелевого зазора не защемлённых частиц позволила теоретически обосновать технологические режимы для обеспечения условий повышенной производительности.

5. Разработанный метод определения производительности в зависимости от пропускной способности щелевого зазора, радиуса диска от радиального расположения на нём куска материала и геометрических параметров измельчаемого материала и диска позволил провести предварительные расчёты предполагаемой теоретической

производительности машины с учётом основных параметров процесса разрушения материала.

6. Предложенный метод определения силовых параметров однощелевой ДИМ комбинированного действия позволил определить суммарный момент сопротивления на валу рабочего органа в процессе дробления и измельчения материалов и уточнить необходимую мощность электродвигателя.

7. Применение новых разработанных конструкций ДИМ комбинированного действия позволяет увеличить степень дробления металлургического сырья и отходов в 1,1...1,6 раза и снизить энергоёмкость процесса диспергирования в 1,9...6,3 раза.

8. Практическое использование новых разработанных конструкций ДИМ комбинированного действия позволяет обеспечить фракционную подготовку боя огнеупорного кирпича для удовлетворения технологических нужд в металлургическом производстве. Кратность помола может достигать 40. Энергоёмкость процесса для основных режимов работы 3–10 кВтч/т.

9. Экономический эффект от применения предложенных конструкций ДИМ комбинированного воздействия на материал заключается в снижении парка дробильно-измельчительного оборудования за счёт комбинирования в одной машине одновременно процессов дробления и измельчения, что сокращает материальные расходы на покупку дополнительных машин, капитальные затраты и обслуживание. Суммарный экономический эффект от внедрения составил 21,650 млн. руб. (1,57 млн. руб. в ценах конца 2020 г. и 20,08 млн. руб. в ценах конца 2022 г.).

Методология и методы исследования: для реализации целей и задач диссертационной работы проведен комплекс теоретических исследований с использованием анализа (при изучении состояния проблемы дробления и измельчения материалов), обобщения и развития научно-технических достижений в области дробления и измельчения материалов с использованием отдельных положений теоретической механики (при проведении энергетического и кинематического анализа работы ДИМ) и математического анализа (при построении математических моделей диспергирования материалов) и дифференциального исчисления (при оценке производительности щелевого зазора), методы геометрического анализа (при определении рациональной формы дробяще-измельчительной полости рабочего органа); методы синтеза и инженерного творчества (при разработке принципиально новых способов и устройств комбинированного воздействия на материал); методы проектирования и конструирования (при разработке и создании новых конструкций ДИМ). Экспериментальные методы исследования процесса измельчения включали

физическое моделирование и использование теории проведения многофакторного планирования и однофакторного проведения экспериментов. При обработке результатов лабораторных и производственных опытов применялись методы анализа и математической статистической обработки данных с использованием критериев Стьюдента, Кохрена и Фишера.

Положения, выносимые на защиту:

— машины для диспергирования материалов, в которых исполнительным органом является вращающийся диск с внутренними фигурными выступами, где процесс разрушения реализуется за счёт комбинирования сдвига и истирания, необходимо относить к классу дисковых ДИМ;

— для обеспечения центрального удара и подачи сырья в зону контакта с рабочей гранью выступа верхнего диска разность расстояния по горизонтали между вертикальной осью и точкой пересечения с траекторией движения куска и расстояния по горизонтали между вертикальной осью ДИМ и точкой отрыва материала от питателя должна быть меньше половины размера исходного куска;

— частота вращения рабочего органа ДИМ комбинированного действия при которой работа сил трения минимальна находится в степенной зависимости с показателем степени 0,5 от высоты падения материала и обратно пропорциональна радиусу и коэффициенту трения дробимого материала по материалу диска;

— центральный удар по куску материала в ДИМ комбинированного действия о выступы рабочего органа можно достичь при обеспечении коэффициента условий проникновения материала в рабочую зону выступов диска $K_a < 0$, что позволяет уменьшить энергию разрушения;

— метод определения моментов сопротивления на валу рабочего органа ДИМ комбинированного действия на основе математической модели силового взаимодействия дисков с дробимым материалом, позволяющая определить суммарный крутящий момент учитывающий действие ударных нагрузок вертикально движущимся потоком исходного материала, сопротивление скручиванию материала в центре камеры измельчения, сопротивление измельчению в дробяще-измельчительных полостях, сопротивление трению в щелевом зазоре и сопротивление разгрузочных скребков.

Соответствие паспорту специальности — область исследования соответствует пунктам 1, 3, 5 паспорта специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям).

Степень достоверности и апробация результатов научных положений и выводов базируется на использовании общеизвестных

методов математического анализа, теоретической механики, сопротивления материалов и деталей машин; корректности допущений при математическом моделировании; подтверждения основных теоретических положений данными экспериментальных исследований на физических моделях (в том числе в результате многофакторных исследований) и опытных образцах (натурных исследований) ДИМ с комбинированным действием на материал; применением поверенного измерительного оборудования; устойчивым повторением полученных результатов. Числовые значения отклонений расчётных и экспериментальных данных не превышают 15,8 %. При построении экспериментальных графических зависимостей достоверность аппроксимации составляет от 14 % до 0,1 %. Табличное значение критерия Кохрена $G_T=0,3$, расчётные значения $G_{y1}=0,2$, $G_{y0}=0,29$; табличное значение критерия Стьюдента $t_T = 4,303$, расчётное t_p не превышает 2,34; табличное значение критерия Фишера $F_m=4,4$, расчётные значения $F_{1p}=2,737$, $F_{2p}=0,997$.

Основные результаты диссертации были представлены, обсуждались и получили позитивную оценку на Международной заочной научно-практической конференции «Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов» (2016 — Биробиджан); Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития науки, техники и технологий» (2016 — Кемерово); на I, III, IV, V, VI международных научно-технических конференциях ДонГТУ «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (2016, 2018–2021 — Алчевск); Международной научно-технической конференции, посвящённой 50-летию кафедры «Машины металлургического комплекса» (2016 — Алчевск); III, VI, VII Международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов» (2017, 2020, 2021 — Донецк); Международной научно-технической интернет-конференции «Актуальные вопросы механики текучих сред», приуроченной к 60-летию образования кафедры «Гидрогазодинамика» ГОУВПО Луганский национальный ун-т им. В. Даля (2017 — Луганск); Международной научно-исследовательской конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (2017 — Трёхгорный); IV междисциплинарном научном форуме с Международным участием «Новые материалы и перспективные технологии» (2018 — Москва); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали» (2020 — Алчевск); XII Международной молодёжной научной конференции «Планета – наш дом» (2020 — Алчевск); юбилейной Международной научно-технической

конференции «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации» (2022 — Алчевск); IV Международной научно-практической конференции «Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства» (2022 — Чебоксары).

Результаты исследования реализованы в ДИМ комбинированного действия используемой в переработке боя огнеупоров на Филиале №1 Южного горно-металлургического комплекса «Алчевский металлургический комбинат», рекомендации по созданию и изготовлению дробилки переданы для использования на ООО «Завод Стальной Дроби ЛТД» (г. Алчевск). Суммарный годовой экономический эффект составляет 21650 тыс. руб.

Отдельные положения диссертации используются в учебном процессе на кафедрах «Машины металлургического комплекса» и «Прикладная гидромеханика» факультета металлургического и машиностроительного производства, а также на кафедре «Экология и безопасность жизнедеятельности» горного факультета ФГБОУ ВО ЛНР «ДонГТУ».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 70 научных работ и 1 учебник с грифом Министерства образования и науки ЛНР, в том числе 5 монографий, 22 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при МОН ЛНР для публикации основных результатов диссертаций, 21 доклад на научных конференциях, 20 патентов и авторских свидетельств.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, выводов, заключения, шести приложений и списка использованных источников. Работа изложена на 395 страницах машинописного текста, из которых 311 страниц основного текста и 87 страниц приложений, содержит 112 рисунков (из них 19 страниц заняты только рисунками) и 18 таблиц (из них 1 страница содержат лишь таблицы). Библиография включает в себя 239 источника, указанных на 29 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлена её общая характеристика, сформулированы цель и решаемые задачи. Указаны главные положения научной новизны, научное и практическое значение работы и выносимые на защиту положения.

В первой главе проведён анализ текущего состояния научно-технической проблемы дробления и измельчения материалов, основных типов машин и способов разрушения, применимых в металлургии для переработки сырья и отходов производства и преимуществ применения ДИМ комбинированного действия на материал. Большой вклад в развитие

теории и практики диспергирования материалов внесли: С.Е. Андреев, Л.И. Барон, В.С. Блохин, В.С. Богданов, И.К. Борискин, В.Я. Борщёв, В.И. Большаков, В.А. Волковский, В.Н. Гончаров, В.А. Елисеев, Л.В. Жога, Б.В. Клушанцев, А.И. Кондратов, А.Д. Линч, В.И. Макаров, Н.Г. Малич, Д.В. Марков, Ю.А. Музеймек, В.А. Олевский, Г.Н. Оскаленко, В.А. Перов, Ю.В. Пожидаев, Р.А. Родин, К.Ф. Родаттис, А.И. Рублёв, И.А. Семикопенко, Е.Е. Серго, П.М. Сиденко, Н.И. Сокур, В.В. Товаров, С.А. Учитель, В.А. Фёдоров, Г.С. Ходаков, и др.

Выявлено, что вопросам научного изучения ДИМ комбинированного действия внимания практически не уделялось за редким исключением отдельных узких вопросов не учитывающих всей полноты создания теоретических основ работы таких машин, а в известных источниках в основном лишь рассматривалось незначительное совершенствование отдельных конструкций.

На основании выполненного анализа состояния вопроса усовершенствована общая классификация и структура основных дробильных и измельчительных машин, применяемых в металлургии.

Рассмотрено оборудование и основные пути его расчёта, выявлено, что дисковым мельницам существенного внимания не уделяется, хотя на их основе возможно несложное создание машин комбинированного действия, способных заменить высокоэнергоёмкие способы разрушения сырья в рабочей камере на менее энергоёмкие, тем самым сократив парк дробильного оборудования при требуемой степени измельчения и удельной энергоёмкости (рис. 1).

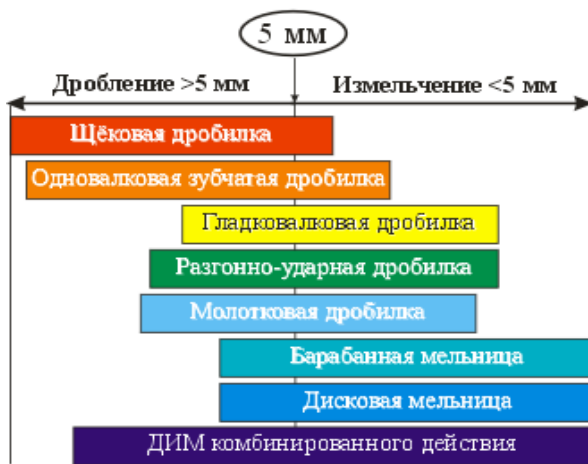


Рисунок 1 — Диапазон диспергирования различных машин

Это может быть достигнуто за счёт изменения конструкции внутренних полостей рабочих органов дисковых измельчителей, когда подавляющая часть материала дробится в вертикальной плоскости за счёт менее энергозатратных удара, среза и излома, а высокоэнергоёмкое истирание применяется в минимальном соотношении лишь на конечном этапе, непосредственно при выходе готового продукта.

Проведенный анализ показал большие перспективы модернизации машин дискового типа с целью организации в них многостадийного разрушения материалов, что способствует сокращению парка машин иных типов и сокращению затрат на переработку сырья.

Во второй главе выполнен синтез способов и устройств комбинированного действия и описаны перспективы их развития. Даны основные характеристики ДИМ, применяемых в металлургии, описаны предпосылки создания принципиально новых ДИМ. На основе чего, а также известных ранее разновидностей подобных машин предложена их новая классификация.

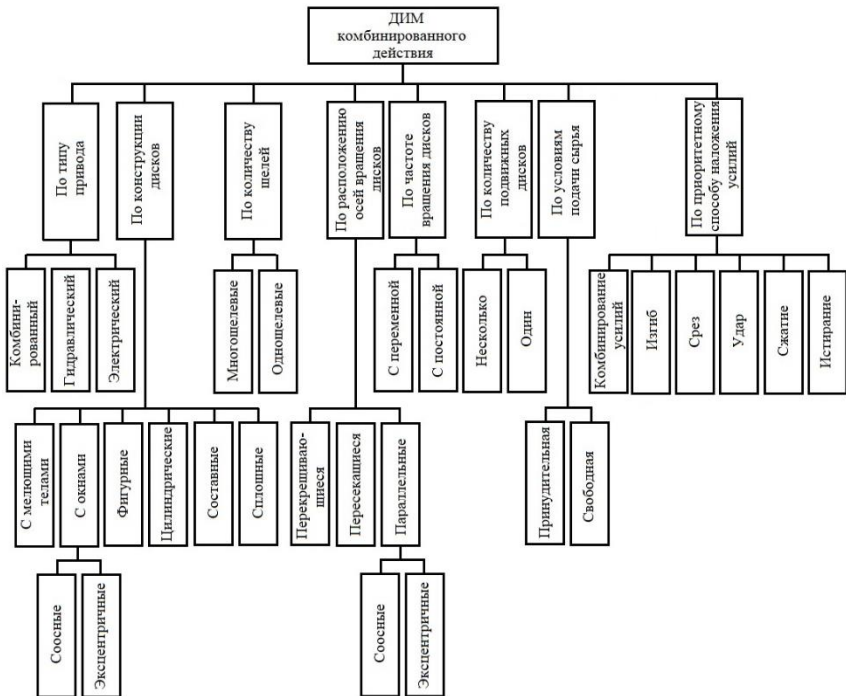


Рисунок 2 — Классификация ДИМ комбинированного действия

С учётом того, что классификация дисковых машин практически отсутствует, предлагается классификация ДИМ комбинированного действия по конструктивным особенностям рабочих органов, согласно которой дисковые ДИМ, сочетающие в себе процессы разрушения материалов сдвигом и истиранием, рассматриваются в виде отдельного класса.

На основе матрицы вариантов 19 основных принципиально новых конструкций машин рассмотрен технологический эффект, обеспечиваемый тем или иным схематическим исполнением. Приведена практика синтеза создания условий самоизмельчения материалов в ДИМ (2 изобретения), интенсификации движения материала внутри рабочей камеры (11 изобретений), дополнительного создания условий среза (3 изобретения) и создания комбинированных ДИМ (3 изобретения).

В третьей главе представлены результаты теоретического обоснования процессов работы ДИМ: проанализированы вопросы подачи сырья в ДИМ наиболее распространёнными способами, а именно ленточным (рис. 3), вибрационным конвейерами и из бункера.

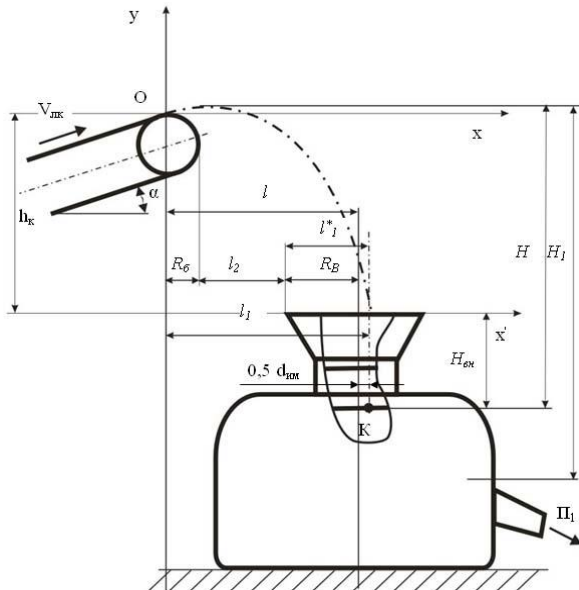


Рисунок 3 — Схема загрузки материала в ДИМ

При этом движение тела, движущегося под углом α к горизонту, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} x = V_0 \cdot \cos \alpha \cdot t \\ y = V_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases} \quad (1)$$

где V_0 — начальная скорость куска исходного материала в точке O .

t — время движения.

С целью обеспечения центрального удара и подачи сырья непосредственно в зону контакта с рабочей гранью выступа верхнего диска должно выполняться соотношение:

$$l_1 - l \leq 0,5 \cdot d_{\text{ум}}, \quad (2)$$

где l — расстояние по горизонтали между вертикальной геометрической осью дробилки и точкой отрыва куска материала;

l_1 — расстояние по горизонтали между осью y и точкой пересечения с траекторией геометрического центра куска материала внутри рабочей камеры машины;

$d_{\text{ум}}$ — крупность материала.

$$l_1 = \frac{V_0 \cdot \cos \alpha \left(V_0 \cdot \sin \alpha + \sqrt{V_0^2 \cdot \sin^2 \alpha + 2 \cdot g (h_k - H_{\text{ен}})} \right)}{g} + 0,5 \cdot d_{\text{ум}} \quad (3)$$

Скорость движения ленты и производительность с учётом основных геометрических параметров ДИМ и исходной крупности материала:

$$V_{\text{лк}} = \frac{(0,5 \cdot d_{\text{ум}} + R_{\delta}) \cdot g}{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_k + H_{\text{ен}})}}, \quad Q_k = 3600 \cdot V_{\text{лк}} \cdot F \cdot \rho_n, \quad (4)$$

где R_{δ} — радиус барабана конвейера с учётом толщины ленты;

g — ускорение свободного падения;

h_k — расстояние по вертикали от точки отрыва куска материала с ленты конвейера до верхней плоскости загрузочной воронки дробилки;

$H_{\text{ен}}$ — расстояние от горловины загрузочной воронки до рабочего диска;

F — площадь сечения материала на ленте;

ρ_n — насыпная плотность исходного материала.

На основе теоремы об изменении количества движения частота вращения, при которой значение работы сил трения будет равно нулю:

$$n = \frac{2 \cdot \sqrt{g \cdot H}}{R \cdot f}. \quad (5)$$

R — радиус вращения частицы;

f — коэффициент трения;

H — высота падения частицы.

Производительность по пропускной способности щелевого зазора;

$$Q' = A \cdot P \cdot (V \varepsilon_c + V' \varepsilon_3) \cdot P(V), \quad (6)$$

где $A = f(n_{щ}) \cdot 3600\pi \cdot d_b \cdot \delta_{cp} \cdot \gamma$;

d_b — внутренний диаметр диска;

P — полная вероятность попадания частиц минимального δ_{min} , среднего δ_{cp} и δ_{max} максимального щелевого зазора;

V, V' — скорости частиц при не защемлённом и защемлённом движении;

$\varepsilon_c, \varepsilon_3$ — относительная длина окружности, где идёт процесс соответственно не защемлённого и защемлённого движения частиц;

$P(V)$ — вероятности заполнения частицами единичного объёма.

У новой и у машины, отработавшей определённый срок имеется биение зазора δ из-за невозможности идеального изготовления и сборки дисков (рис. 4).

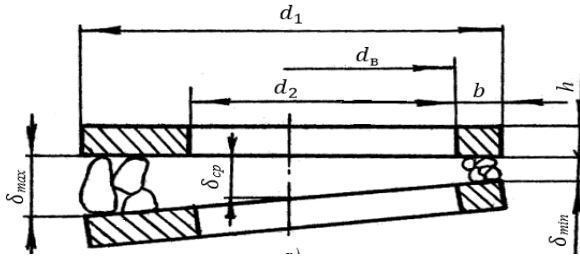


Рисунок 4 — Влияние биения щелевого зазора

В случайном потоке движение частиц $\delta < \delta_{min}$, движущихся в слое более крупных, обгоняют их в относительном радиальном движении, так как не имеют вынужденных круговых проскальзываний из-за защемления между дисками. Решением системы дифференциальных уравнений движения частицы между рабочими элементами установлено, что для обеспечения условий выгрузки не защемлённых частиц частота вращения должна быть больше, чем:

$$n = \frac{30 \sqrt{\frac{f_2 g}{a}}}{\pi}. \quad (7)$$

где f_2 — коэффициент бокового сопротивления между частицами;

a — длина пути частицы от центра вращения к периферии;

g — ускорение свободного падения.

Величина пути, на котором частица разрушится в зоне защемления:

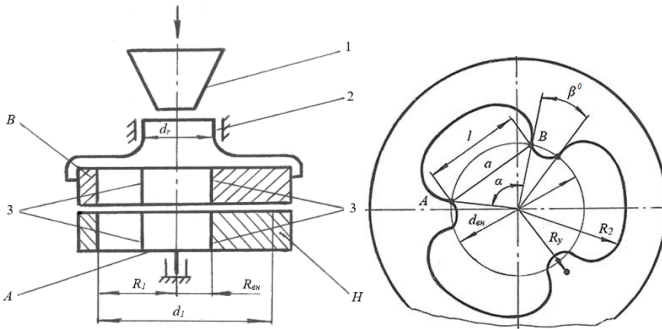
$$S = \frac{(\delta_{max} + \delta_{min}) \cdot \sigma \cdot (E_1 + E_2) \cdot \pi \cdot R}{4 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (\delta_{max} - \delta_{min})} \quad (8)$$

где σ — напряжение разрушения сжатия;

E_1 и E_2 — соответственно модули упругости дисков 1 и 2;

R — радиус на котором происходит сдавливание частицы.

В четвёртой главе рассмотрено определение основных параметров ДИМ с комбинированным воздействием на материал. Описана геометрия рабочей камеры и дисков (рис. 5), характеризующая процессы разрушения в вертикальной плоскости.



1 – загрузочная воронка; 2 – горловина; 3 – диски (B – верхний, H – нижний)

Рисунок 5 — Схема ДИМ и конструкция диска

Если коэффициент условий проникновения материала в рабочую зону выступов диска $K_\alpha \geq 0$, то размеры кусков исходного материала равны или превышают размеры просвета, что не позволяет добиться ударного разрушения. Поэтому таких условий следует избегать.

$$K_\alpha = 1 - \frac{d_{им}}{d_{вн} \cdot \sin\left(\frac{360^\circ - n^* \beta^0}{2n^*}\right)}, \quad (9)$$

где β^0 — центральный угол, между лучами которого расположены крайние кромки выступов;

n^* — количество выступов в рабочем органе.

Суммарный момент сопротивления исходного материала при переработке в камере измельчения определяется формулой:

$$M_c = M_{уд} + M_{ц} + M_{осн} + M_{щ} + M_{ск}, \quad (10)$$

где $M_{уд}$ — крутящий момент сопротивления от действия ударных нагрузок, создаваемых вертикально движущимся потоком исходного материала;

$M_{ц}$ — момент сопротивления скручиванию цилиндрического столба материала, находящегося в центре камеры измельчения;

$M_{осн}$ — сопротивление материала измельчению в дробяще-измельчительных полостях (основной крутящий момент);

$M_{щ}$ — крутящий момент сопротивления трению и доизмельчению на плоскостях щели;

$M_{ск}$ — крутящий момент сопротивления готового продукта движению разгрузочных скребков.

$$M_{уд} = 1,234 \cdot 10^{-3} \cdot k \cdot x^3 \cdot \gamma \cdot n^2 \cdot (R_2 - R_{вн})^2, \quad (11)$$

где k — количество промежутков между выступами рабочего органа;

$x = d_{им}$ — размер исходного материала;

n — частота вращения рабочего органа.

$$M_{ц} = \frac{(2h + \delta) \cdot \gamma_{нас} \cdot f \cdot \pi \cdot d_{вн}^3}{24}, \quad (12)$$

где h — высота (толщина) дисков с учётом величины зазора δ между ними;

$\gamma_{нас}$ — насыпной удельный вес материала;

f — коэффициент трения.

$$M_{осн} = K_{ур} \cdot n_{рп} \frac{(R_2 - R_{вн})^2}{2d_{им}} \cdot \sigma^3 \cdot \frac{R_{им}^2}{E_{им}^2} \cdot \left(\frac{(E_{ст} - E_{им})^2}{E_{ст}^2} + 1 \right), \quad (13)$$

где $K_{ур}$ — коэффициент условий разрушения;

$n_{рп}$ — количество разрушающих полостей в рабочей паре (обычно $n_{рп} = 3$);

σ — нормальное напряжение;

$E_{им}$ и $E_{ст}$ — соответственно, модуль Юнга измельчаемого материала и стали из которой изготовлен рабочий орган.

$$M_{щ} = \frac{\sigma_{пр}^2 \cdot (R_1^2 - R_2^2) \cdot (R_1 + R_2) \cdot (\delta_{max} - \delta_{min}) \cdot (E_{ст} + E_{им})}{19 \cdot R_1 \cdot E_{ст} \cdot E_{им}}. \quad (14)$$

где $\sigma_{пр}$ — предел прочности материала на сжатие;

δ_{min} и δ_{max} — соответственно минимальный и максимальный щелевой зазор между дисками.

$$M_{ск} = 0,175 \cdot \gamma \cdot h_{ск}^2 \cdot b_{ск} \cdot \left[2 + \frac{1}{g} \cdot \frac{\pi^2 \cdot n^2}{900} \cdot (R_1 + 0,5 \cdot b_1) \right] \cdot (R_1 + 0,5 \cdot b_1), \quad (15)$$

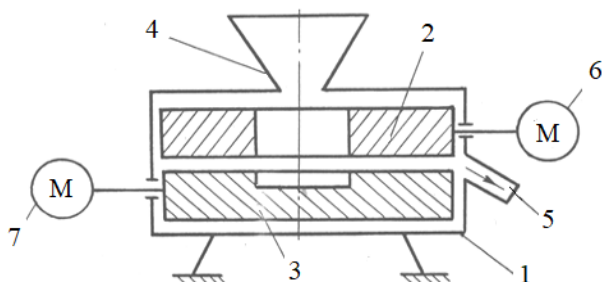
где $h_{ск}$ — высота скребка;

$b_{ск}$ — ширина скребка;

b_l — ширина соскребаемого слоя.

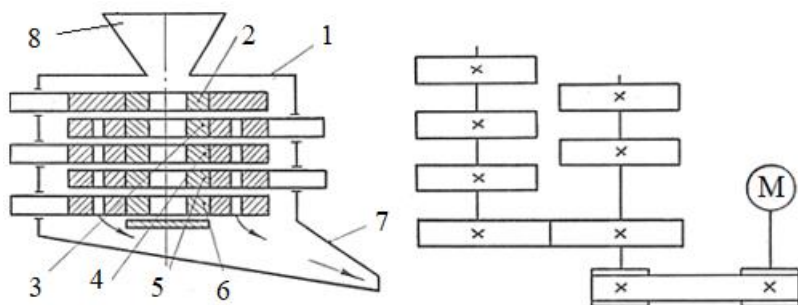
Разработанный метод позволяет определить энергетические характеристики привода при требуемой производительности ДИМ.

В пятой главе приведена документальная и материальная база реализации экспериментов, описаны схемы и конструкции одно- (рис. 6) и многощелевой (рис. 7) ДИМ, порядок проведения однофакторных и многофакторных исследований.



1 — корпус; 2, 3 — диски; 4 — воронка; 5 — течка; 6, 7 — двигатель

Рисунок 6 — Схема экспериментальной установки однощелевой ДИМ



1 — корпус; 2-6 — диски; 7 — течка; 8 — загрузочная воронка

Рисунок 7 — Компоновка и кинематическая схема многощелевой ДИМ

Приведены необходимые данные для статистической обработки полученных результатов с помощью критериев Кохрена, Фишера. Описана приборная база экспериментов для обеспечения необходимых условий варьирования параметров и определения численных значений исследуемых факторов.

В шестой главе представлены результаты лабораторных исследований одно- (диаметр дисков 100 мм, щелевой зазор от 1 до 3,5 мм) и многощелевой моделей ДИМ с комбинированным воздействием на материал. Измельчение щебня исходной фракции 13-5 мм в однощелевой ДИМ показало, что с увеличением частоты вращения рабочих органов с 300 об/мин до 500 об/мин производительность и энергозатраты повышаются с 50 кг/ч до 70 кг/ч. В готовом продукте присутствуют до 10 % частиц крупностью, превышающей размер щели. При переработке железной руды, металлургического известняка, отвального шлака и отходов бетона рабочими органами из стали Гадфильда (110Г13Л) средний износ составил соответственно 0,9 кг/т (при размере щели $\delta=1$ мм), 0,67 кг/т ($\delta=3$ мм) и 0,53 ($\delta=6$ мм), а из белого чугуна 0,47 кг/т ($\delta=1$ мм), 0,34 кг/т ($\delta=2$ мм), 0,23 кг/т ($\delta=3$ мм). Удельные энергозатраты при переработке известняка составили 9,4 кВтч/т ($\delta=1$ мм), 8,6 ($\delta=3$ мм), 0,49 ($\delta=6$ мм).

Отвальный шлак и отходы бетона были помолоты до фракции 2,0–2,5 мм, после чего приготавливалась бетонная смесь для изготовления опытных образцов с заменой кварцевого песка отвальным шлаком и отходами бетона. При этом была установлена возможность экономии более дорогостоящих цемента (до 10 %) и кварцевого песка (до 40 %) без снижения механических прочностных свойств вновь получаемых бетонов.

С помощью многофакторного планирования экспериментов получены уравнения регрессий для потребляемой мощности:

$$N = 3,626 + 0,403 \cdot n_n + 0,424 \cdot n_b + 2,035 \cdot \Phi + 1,035 \cdot \sigma - 1,283 \cdot E + 0,578 \cdot b - 0,716 \cdot H + 0,312 \cdot d + 0,285 \cdot \Delta X_1; \quad (16)$$

и производительности однощелевой ДИМ:

$$Q = 0,326 + 0,036 \cdot R_2 + 0,076 \cdot n_n + 0,039 \cdot n_b - 0,074 \cdot b + 0,034 \cdot H + 0,124 \cdot d + 0,0425 \cdot \Delta X_2, \quad (17)$$

где R_2 — внутренний радиус рабочего диска;

n_n — частота вращения нижнего диска;

n_b — частота вращения верхнего диска;

Φ — параметр, характеризующий форму рабочих органов диска;

σ — предел прочности, измельчаемого материала на сжатие;

E — модуль Юнга измельчаемого материала;

b — ширина полости щелевого зазора;

H — общая высота двух дисков со щелевым зазором;

$d=d_{\text{им}}$ — диаметр кусков исходного материала;

$\Delta X_1, \Delta X_2$ — соответственно дополнительные факторы коррекции

мощности и производительности.

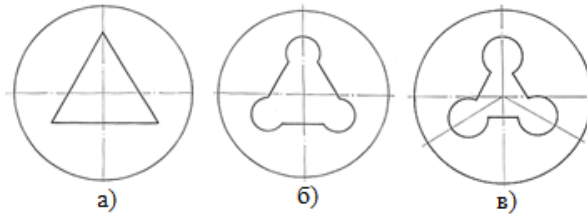
Уменьшение значения N при увеличении модуля упругости материала означает, что менее упругие материалы являются более хрупкими и легче поддаются разрушению механическим способом в машинах исследуемого типа. Увеличение фактора Q снижает потребляемую мощность процесса разрушения, что подтверждает выводы теоретических исследований, проведенных ранее.

Проводились экспериментальные исследования многощелевой ДИМ с диаметрами сменных рабочих органов 75 и 100 мм при межщелевых зазорах от 1 до 3,3 мм и различного количества устанавливаемых рабочих органов, что лимитировало количество разгрузочных щелей. Измельчался исходный материал (щебень) фракций материала 13–5 мм и 20–13 мм.

Было установлено, что с увеличением частоты вращения производительность машины и энергозатраты растут. Количество вращающихся рабочих органов оказывают самую существенную роль на производительность, которая растёт в прямой пропорции до трёх рабочих органов, а увеличение рабочих органов до четырёх показывает нарушение пропорциональности влияния. При увеличении размера щели производительность машины увеличивается, а энергозатраты снижаются. Результаты испытаний показывают, что все характеристики крупности для одного размера щели очень близки и обнаруживают слабую зависимость от других параметров. Так, наблюдается незначительное увеличение фракционного состава готового продукта с увеличением крупности исходного материала.

В процессе анализа результатов влияния формы внутреннего проёма рабочего органа (рис. 8) установлено, что переход формы от треугольника к форме с круглыми карманами (лепесток) оказывает существенное влияние. При одинаковой величине описной окружности производительность изменялась при $n=15 \text{ с}^{-1}$ (900 об/мин) от 18 до 60 кг/ч, а при частоте $n=23,3 \text{ с}^{-1}$ (1400 об/мин) отличие было существенным от 20 до 120 кг/ч.

Характерным для готового продукта является наличие до 10 % частиц, превышающих размер щели. С увеличением крупности исходного материала производительность падает, а энергозатраты возрастают. Это согласуется с предположением, что при крупности исходного материала, соизмеримой с величиной щели, энергия расходуется в основном на перемещение и динамика процесса направлена на выпуск материала из щели. Производительность изменяется от 100 до 400 кг/ч.



а) треугольной формы; б) промежуточной формы; в) лепестковой формы

Рисунок 8 — Разновидности конфигурации рабочих органов

Таким образом большое влияние оказывает излом и рубящие действия кромки рабочего органа.

С возрастанием крупности исходного материала и уменьшением размера щелей энергоёмкость процесса увеличивается. Обеспечивается высокая производительность, достигающая 200–300 кг/ч при объёме рабочей камеры $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ с устойчивыми характеристиками крупности продукта. Кратность помола может достигать 40. Энергоёмкость процесса для основных режимов работы составляла 3–10 кВтч/т.

Производительность модели ДИМ в исследуемом диапазоне скоростей рабочих органов устойчиво возрастает при увеличении скорости. При увеличении крупности исходного материала производительность уменьшается. С увеличением размера щели производительность увеличивается близко к прямой пропорциональной зависимости. При увеличении объёма рабочей камеры производительность возрастает, причём более существенный рост наблюдается с увеличением рабочих скоростей.

Результаты исследовательских испытаний показывают, что однощелевая ДИМ уступает многощелевой по производительности, но имеет лучшие показатели по энергозатратам.

В седьмой главе приведены результаты производственных испытаний в условиях филиала №1 Южного горно-металлургического комплекса «Алчевский металлургический комбинат» при использовании лабораторной модели ДИМ–250 (цифры обозначают диаметр рабочих органов) и опытных образцов ДИМ–1800 и ДИМ–2250 (рис. 9).

На рисунке 10 показаны рабочие органы ДИМ–2250. Для ДИМ–250 производительность составила 159 кг/ч (по хромомagneзиту), 103 кг/ч (по известняку) и 156 (по железной руде). А Для ДИМ–2250 производительность составила 9,2 т/ч (по хромомagneзиту), 7,1 т/ч (по известняку) и 8,4 т/ч (по железной руде). Гранулометрический состав готового продукта для ДИМ–2250 показан на рисунке 11.



Рисунок 9 — ДИМ–2250

Аппроксимирующие уравнения крупности гранулометрического состава готового продукта $y_{из}$ при измельчении соответствующего сырья в ДИМ–2250 в процентах с величинами достоверности аппроксимации для железной руды $y_{жр}^{2250} = 19,4 \cdot \lg x + 56,95$, $R_{жр}^{2250} = 0,86$; для известняка $y_{из}^{2250} = 16,0 \cdot \lg x + 67,90$, $R_{из}^{2250} = 0,849$; для хромомagnesита: $y_{хм}^{2250} = 19,37 \cdot \lg x + 67,0$; $R_{хм}^{2250} = 0,96$.



Рисунок 10 — Вид на рабочие органы ДИМ–2250

В соответствии с экспериментальными исследованиями и лабораторном анализе полученных проб готового продукта полученные при переработке отходов производства с помощью ДИМ–2250 порошки,

соответствуют нормативным требованиям и могут применяться в необходимых технологических операциях.

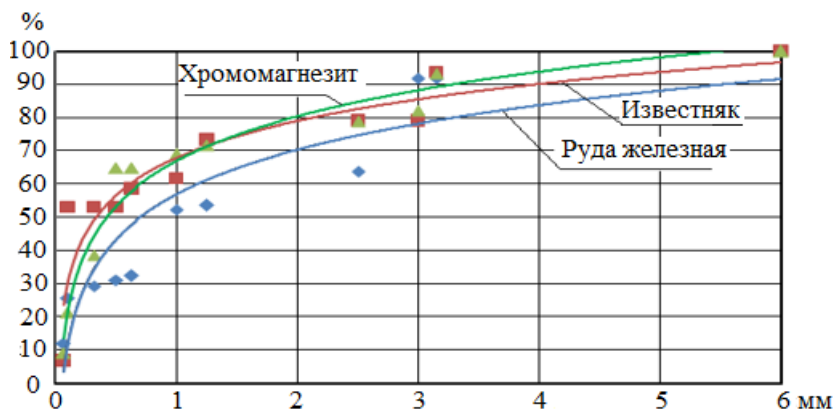


Рисунок 11 — Гранулометрический состав готового продукта

В ходе производственных испытаний в течение года ДИМ–2250 при односменной работе и обслуживании двумя операторами перерабатывала в порошки более 5000 тонн хромагнетитового, магнезитового и шамотного лома при степени измельчения, достигающей 60 и частоте вращения рабочих органов 750 об/мин. За это время, было заменено два комплекта рабочих дисков.

Проводился сравнительный анализ качества помола известняка, произведённого ДИМ–2250 с имеющейся молотковой дробилкой ДМРИЭ 14.5×13–1000.

Для измельчения известняка на аглофабриках задействовано 7 единиц оборудования с общей мощностью электродвигателей 777 кВт, весом более 50 т и длиной конвейеров более 110 м. Производительность комплекса по классу известняка 0–3 мм составляет примерно 30–50 т/ч, т.е. для получения 1 т известняка затрачивается 15,5–26 кВт. Установленное оборудование расположено в двух корпусах и работает практически непрерывно (около 20 ч в сутки), требует систематической смазки, ремонта, замены сит грохотов, молотков дробилок, расход металла которых на 1 т известняка составляет 0,023 кг. Поэтому альтернативная подготовка известняка позволила бы значительно сократить количество единиц оборудования.

Форма зёрен известняка различных классов крупности после молотковой дробилки (при изучении под микроскопом с десятикратным увеличением) характеризуется многогранниками с острыми гранями, что

свидетельствует о воздействии при разрушении раскалывающих, ударных нагрузок и практическом отсутствии истирающих. На это же косвенно указывает и небольшая доля мелких (до 0,16 мм) фракций.

Измельчение известняка в ДИМ–2250 производили в двух режимах: при минимальной выходной щели 2 мм и при максимальной 8 мм. Конечный гранулометрический состав известняка при минимальной щели определяется практически одной фракцией размером 0,16–0,063 мм, количество которой в пробах колеблется от 66,6 до 73 %.

Средний диаметр зёрен колеблется от 0,361 до 0,630 мм и коэффициенте вариации около 0,5. Форма зёрен овальная, со сглаженными углами и гранями, что указывает на наличие больших истирающих нагрузок при разрушении. В целом по верхнему пределу 3 мм известняк, измельчённый ДИМ–2250, удовлетворял требованиям аглофабрики. Однако резкое уменьшение фракций 1–2, 2–3 и более 3 мм по сравнению с известняком после грохота (10 % и 50 % соответственно) может привести к ухудшению процесса окускования и спекания шихты. Для получения более крупного известняка выходную щель ДИМ–2250 увеличили до 8 мм.

Количество фракции более 1 мм в гранулометрическом составе готового продукта составляет более 55 %, это говорит о том, что размер щели необходимо уменьшать. Проведенные исследования показали, что для данной щели необходимо увеличивать производительность машины и обеспечить её эксплуатацию в непрерывном режиме, что является предметом дальнейших перспективных направлений работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в диссертационной работе теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать научно обоснованные подходы и алгоритмы, методы анализа и синтеза ДИМ комбинированного действия на материал применительно к металлургическому сырью и отходам. Это позволяет обеспечить решение научно-технической проблемы разработки, проектирования и модернизации дисковых машин с повышенной эффективностью работы. Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. В широко применяемых ДИМ комбинированное эффективное сочетание процессов дробления и измельчения встречается крайне редко, что вызвано конкретными условиями разрушения и конструктивными решениями. При этом выявлено, что в дисковых измельчителях рациональными условиями снижения энергозатрат на переработку сырья является перераспределение преимущественных разрушающих усилий истирания в сторону менее энергоёмких (удара и среза) с окончательным

калиброванием готового продукта через межщелевой зазор, что легко достижимо путём комбинирования таких условий в рабочей камере машины.

2. Получены для расчёта загрузочных устройств зависимости, которые позволяют по известным характеристикам дробильной машины и исходного материала определять основные монтажные параметры системы питания, производительность, оптимальные скорости и габаритные параметры загрузочного конвейера, что выступает теоретической инженерной базой при проектировании.

3. Теоретические исследования вертикального падения кусков, обладающих различной формой показывают, что вероятность их эффективного разрушения при свободном падении является незначительной, ввиду недостаточной потенциальной энергии для разрушения, поэтому решающую роль играют процессы в междисковом пространстве, когда условия ударного разрушения в большей степени зависят от частоты вращения рабочих органов. В рабочем объёме щели происходит сложное движение частиц, траектории которых имеют случайный характер, поэтому аналитическое определение скорости истечения готового продукта из щели затруднено. При установившемся режиме работы готовый продукт выводится практически с постоянной скоростью.

4. Наиболее устойчивым в случайном потоке является движение частиц при величине зазора превышающем минимальный, которые движутся в слое более крупных, обгоняя их в относительном радиальном движении, так как не имеют вынужденных круговых проскальзываний из-за защемления между дисками, что имеет место у более крупных частиц.

5. Для расчётной средней скорости движения не защёмлённых частиц при разнице между минимальным и максимальным зазором до 0,2 мм ошибка составляет 4,5%, однако в дальнейшем она возрастает, что требует применения расчётных зависимостей с учётом средних значений размера щели.

6. Установлено, что вертикальная реакция, создающая в системе осевые нагрузки изменяется от 0 до 0,5 величины удельного давления в плоскости сечения и практически сливается с реакцией, проходящей через центр частиц при их наклонном размещении, где обе реакции становятся нечувствительными к изменению угла наклона расположения частиц от 78° до 88° , а далее стремятся к пределу, ограниченному критической величиной удельного давления в плоскости сечения равному 5,5 МПа.

7. При однослойном размещении частиц в междисковом пространстве возможно их «прокатывание» без разрушения, однако при угле наклона расположения частиц менее 78° может произойти

разрушение от окружного усилия, примерно равного $0,1$ максимального возможного давления. Начиная с двухслойного расположения частиц исходного материала и для любого количества слоёв больше одного, возможность использовать в режиме случайного процесса измельчения вероятность реализации минимальных окружных усилий развивается не после первичного дробления, а сразу же после попадания в камеру дробления. Рабочий орган с однослойным заполнением дробяще-измельчительных полостей характеризуется максимальным значением давления, поэтому такая конструкция невыгодна с точки зрения затрат энергии на первичное измельчение.

8. Крутящий момент в зависимости от сопротивления плоскости щелевого зазора определяется параметрами напряжения, действующего на материал, внешнего и внутреннего радиусов внутренних полостей и величиной щелевого зазора, а момент сопротивления готового продукта движению разгрузочных скребков — от их высоты и ширины, радиуса диска и удельного веса материала.

9. Результаты синтеза принципиально новых конструкций показали, что измельчение сырья путём саморазрушения друг о друга является перспективным направлением и способствует повышению степени измельчения, выровненности готового продукта, однако требует усложнения конструкций мельниц, направленных на обеспечение устойчивой подачи материала в рабочую камеру. Интенсификация движения материала внутри рабочей камеры может достигаться организацией сырьевого подпора, концентрацией разрушающих усилий за счёт более высокой концентрации разрушающей нагрузки, знакопеременными нагрузками и усилиями сдвигов, и реверсированным воздействием. Создание дополнительных условий среза обеспечивает разрушение сырья с меньшими энергозатратами, что достигается внутри рабочей камеры ДИМ при последующем калибровании готового продукта в щелевом зазоре на периферии дисков, при этом комбинированное воздействие на материал обеспечивает повышенную эффективность за счёт объединения в себе по сути нескольких машин, в единой конструктивной базе.

10. Путём анализа результатов синтеза принципиально новых ДИМ разработаны основы классификации ДИМ, обладающих эффектом комбинированного воздействия на перерабатываемый материал, выявлены широкие возможности конструирования и применения таких машин, где одним из перспективных направлений развития является использование гидротолкателей, управляемых программируемым микропроцессором.

11. Производительность и энергозатраты однощелевой ДИМ повышаются с увеличением частоты вращения рабочих органов и не являются прямо-пропорциональным. С увеличением частоты вращения при

$n=5 \text{ с}^{-1}$ (300 об/мин) до $n=8,3 \text{ с}^{-1}$ (500 об/мин) происходит повышение производительности от 50 кг/ч до 70 кг/ч. В готовом продукте содержится до 10% частиц, с размерами, превышающими размер щели. При величине щели 3,5 мм энергозатраты составляют ориентировочно 3–5 кВтч/т, а при величине щели 1,0 мм — 8–12 кВт ч/т. Частота вращения, абсолютный размер проёма рабочих органов и крупность исходного материала оказывают незначительное влияние на качество готового продукта. Степень измельчения может достигать от 1 до 100.

12. Для многощелевых ДИМ производительность устойчиво возрастает при увеличении частоты вращения, а при большей крупности исходного материала уменьшается. С увеличением размера щели, как и при увеличении объёма рабочей камеры производительность увеличивается близко к прямой пропорциональной зависимости. Для исследуемой модели производительность достигает 200–300 кг/ч при объёме рабочей камеры $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ с устойчивыми характеристиками крупности продукта при степени измельчения около 40. Энергоёмкость процесса для основных режимов работы составила 3–10 кВтч/т.

13. Промышленные испытания показали, что ДИМ–2250 при переработке хромомagneзитового, магнезитового и шамотного лома обладает производительностью около 10–12 т/ч при степени измельчения достигающей 60, при достаточно высокой износостойкости рабочих органов получаемые порошки, соответствуют нормативным требованиям и могут являться сырьём для иных технологических процессов и операций. При минимальной щели средний диаметр зёрен в готовом продукте колеблется от 0, 361 мм до 0, 630 мм.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в применение гидропривода, позволяющего значительно повысить усилия разрушения в ДИМ и обеспечивать широкий диапазон изменения частот вращения рабочих органов.

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения ДИМ комбинированного действия составляет 21650 тыс. руб.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии и учебники

1. Левченко, О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст]: монография / О. А. Левченко, Э. П. Левченко, А. М. Зинченко и др. — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — 190 с. *(проанализированы и обоснованы вопросы организации эффективных условий разрушения материала).*

2. **Левченко, Э. П.** Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах [Текст]: монография / Э. П. Левченко, О. А. Левченко, А. М. Зинченко и др. — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — 225 с. *(выполнен анализ и синтез новых измельчительных машин, проведены аналитические исследования).*

3. **Левченко, Э. П.** Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-летней изобретательской деятельности) [Текст]: монография / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — 353 с. *(предложены новые методы синтеза дробильно-измельчительного оборудования).*

4. Власенко, Д. А. Математическое моделирование и повышение эффективности ударных роторных дробилок с комбинированным подвесом молотков [Текст]: монография / Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко**. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — 143 с. *(обоснованы технические решения и методы исследования ударного разрушения).*

5. Власенко, Д. А. Развитие научных основ и практика повышения эффективности процессов дробления в роторных зубчатых дробилках [Текст]: монография / Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко**. — Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2022. — 143 с. *(установлены теоретические и экспериментальные зависимости работы дробилки).*

6. **Левченко, Э. П.** Проектирование гидропривода дробильно-измельчительных машин [Текст]: учебник / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, В. Г. Чебан и др. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2022. — 316 с. *(заложены основы разработки и усовершенствования ДИМ).*

Статьи, опубликованные в рецензируемых, научных изданиях, рекомендованных ВАК при МОН ЛНР для публикации основных результатов диссертационных исследований

7. **Левченко, Э. П.** Некоторые этапы исследования работы разгонно-ударных дробильно-измельчительных машин [Текст] / Левченко Э. П. Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2007. — Вып. 25. — С 34–43.

8. Щербак, В. В. Определение рациональной скорости загрузочного конвейера рудно-дробильного комплекса [Текст] // В. В. Щербак, **Э. П. Левченко** // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 32. — Алчевск, 2010. — С. 227–233. *(теоретически обоснованы параметры конвейера при работе в комплексе с дисковой машиной).*

9. Левченко, О. А. Состояние и основные направления развития технического уровня конструкций одновалковых зубчатых дробилок

[Текст] / О. А. Левченко, **Э. П. Левченко**, А. М. Зинченко // *Металлургические процессы и оборудование*, 2011. — № 1. — С. 24–29. *(систематизированы новые конструкции дробилок)*.

10. Левченко, О. А. Комбинированные дробильно-измельчительные машины и возможности их применения для измельчения отходов шамотного кирпича [Текст] / О. А. Левченко, **Э. П. Левченко**, А. М. Зинченко и др. // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 33. — Алчевск, 2011. — С. 171–179. *(обоснованы и теоретически изучены процессы комбинированного воздействия на измельчаемый материал)*.

11. Власенко, Д. А. Структурный анализ процесса диспергирования извести в агломерационном производстве [Текст] / Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко** // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 44. — Алчевск: ДонГТУ, 2015. — С. 82–86. *(разработана структурная модель и способы её научного анализа)*.

12. **Левченко Э. П.** Особенности применения гидропривода в щековых дробилках [Текст] / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, Н. Э. Онищенко // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 5 (48). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 81–85. *(обоснована возможность применения гидропривода)*.

13. **Левченко, Э. П.** Повышение эффективности дисковых измельчителей [Текст] / А. Н. Тумин, Э. П. Левченко, Н. Г. Алфёров // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 5 (48). — Алчевск, 2017. — С. 92–96. *(предложены и исследованы возможности создания комбинированных усилий на материал с помощью гидропривода)*.

14. Власенко Д. А. Анализ отклонения молотков с комбинированным креплением бил в дробилках ударного действия [Текст] / Д.А. Власенко, **Э. П. Левченко**, О. И. Павлиненко // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 3 (46). — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — С. 156–160. *(исследовано влияние на обычного и комбинированного крепления бил)*.

15. Власенко, Д. А. Влияние способа крепления молотков на оси ротора на скорость движения известняка к отбойной плите в ударной дробилке [Текст] / Д.А. Власенко, **Э. П. Левченко**, Н. А. Бондарь // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 5 (48). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 180–184. *(предложена методика расчёта скорости)*.

16. Павлиненко, О. И. Повышение эффективности раскалывания стальной дробы в шаровой мельнице [Текст] / О.И. Павлиненко, **Э. П. Левченко**, О. А. Левченко и др. // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. — Вып. 5 (48). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 86–91. *(предложены и обоснованы направления повышения эффективности)*.

17. Мороз, В.В. Анализ обеспечения возможности организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В.В. Мороз, **Э. П. Левченко**, В.И. Рубежанский // *Сборник научных трудов*

ДонГТУ. — Вып. 5 (50). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 153–157. *(теоретически обоснована возможность многоступенчатого диспергирования).*

18. Тумин, А.Н. Расчёт вынужденных периодических движений толкателя дисковой мельницы при пропорциональной нагрузке [Текст] / А.Н. Тумин, **Э.П. Левченко**, Е.Е. Бизянов и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 11 (54). — Алчевск: ДонГТУ, 2018. — С. 136–142. *(обоснован механизм и принцип периодического движения толкателей).*

19. Власенко, Д. А. Влияние параметров подачи материала в рабочую зону молотковой дробилки на условия процесса соударения [Текст] Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко** // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 6 (51). — Алчевск, 2017. — С. 140–144. *(обоснована идея подачи сырья в дробилку и способ её исследования).*

20. Мороз, В.В. Оценка и уточнение условий подачи аглоспека в рабочую зону одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В.В. Мороз, В.И. Рубежанский, **Э.П. Левченко** // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2018. — Вып. 9 (52). — С. 149–153. *(математически исследованы возможности подачи агломерата).*

21. Тумин, А. Н. Разработка системы управления для реализации вынужденных колебаний рабочей гарнитуры в дисковой мельнице [Текст] / А. Н. Тумин., **Э. П. Левченко**, А. М. Новохатский и др. // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 9 (52), — Алчевск: ДонГТУ, 2018. — С. 142–148. *(научно обоснован способ периодического качания диска для создания комбинированных условий разрушения сырья).*

22. **Левченко, Э. П.** Математическое моделирование процесса изнашивания молотков при дроблении материала свободным ударом [Текст] / Э. П. Левченко, Д.А. Власенко, Н. А. Бондарь // Вестник Донецкого национального технического университета. ДонНТУ, № 1 (15), 2019. — С. 8–15. *(разработана методика математического анализа).*

23. Жильцов, А. П. Исследование и обоснование конструктивно-технологических параметров процесса измельчения агломерационных флюсов в молотковой дробилке [Текст] / А. П. Жильцов, Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко** // Черные металлы. № 10 (1054), 2019. — С. 4–9. *(выполнены экспериментальные исследования измельчения известняка).*

24. Спорняк, В. Г. Направления перспективного использования двухступенчатого малогабаритного универсального измельчителя [Текст] / В. Г. Спорняк, **Э. П. Левченко** // Сборник научных трудов ДонГТУ. — № 17 (60). — Алчевск: ДонГТУ, 2019. С. — 113–118. *(аналитически обоснован принцип комбинированного разрушения материала).*

25. Жильцов, А.П. Анализ и обоснование параметров процесса раскалывания стальной сферической дробы стеснённым центральным

ударом [Текст] / А.П. Жильцов, **Э. П. Левченко**, О. И. Павлиненко и др. // Черные металлы. № 8 (1064). 2020. — С. 29–33. *(выполнены экспериментальные исследования прямого стеснённого удара)*.

26. **Левченко, Э. П.** Обоснование основных параметров роторно-ударного измельчителя, реализующего условия стеснённого удара [Текст] / Э. П. Левченко, О. И. Павлиненко, В.Г. Чебан и др. // Сборник научных трудов ДонГТИ. — № 22 (65). — Алчевск: ДонГТИ, 2021. — С. 100–105. *(разработана методика исследований определения основных параметров)*.

27. Власенко, Д. А. Уточнённая классификация отдельных типов дробильного оборудования предприятий чёрной металлургии [Текст] / Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко** // Вестник Луганского государственного университета им. В. Даля.: ГОУ ВО Луганский государственный ун-т им. В. Даля. — № 6(48). — Луганск, 2021 — С. 43–50. *(разработана уточнённая классификация валковых дробилок)*.

28. **Левченко, Э. П.** Разработка имитационной модели гидропривода одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / Э. П. Левченко, А. Н Тумин, Р. Ю. Ткачѳв // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2021. — № 11 (53). — С. 137–140. *(предложена методика исследований гидропривода дробилки)*.

29. **Левченко Э.П.** Исследования принципа комбинированного воздействия на материал в дисковых дробильно-измельчительных машинах [Текст] / Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2023. — Вып. 30 (73). — С. 99–104.

Доклады на научных конференциях

30. **Левченко, Э. П.** Построение экспериментальных моделей физических процессов в дробильно-измельчительных устройствах [Текст] / Левченко Э. П., Мороз В. В., Власенко Д. А. и др. // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов: сборник материалов Международной заочной научно-практической конференции. Ч. 2 – Биробиджан: ИЦ им. Шолом-Алейхема, 2016. — С. 90–94. *(предложена комплексная методика разработки и создания физических моделей)*.

31. **Левченко, Э. П.** Обобщённый структурный подход к процессам механики дробильно-измельчительной техники металлургического комплекса [Текст] / Э. П. Левченко, В. В. Мороз, О. И. Павлиненко и др. // Приоритетные направления развития науки, техники и технологий: сборник трудов международной научно-практической конференции. — Кемерово, 2016. — С. 231—234. *(обоснованы научные подходы многофакторных исследований и применения теории подобия)*.

32. Алфёров, Н. Г. Гидравлическое управление сжимающими нагрузками в дисковой мельнице [Текст] / Н. Г. Алфёров, **Э. П. Левченко**, А. Н. Тумин // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: материалы международной научно-технической конференции Дон ГТУ. — Алчевск, 2016. — С. 26–27. *(проанализированы возможности применения гидропривода для повышения концентрации комбинированных нагрузок на материал).*

33. Павлиненко, О.И. Электризация при измельчении материалов и ее минимизация [Текст] / О.И. Павлиненко, М.А. Савицкая, **Э. П. Левченко**, Д.А. Вишневецкий // Актуальные вопросы эффективности управления безопасности труда: материалы международной научно-практической конференции. — Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. — С. 45–48. *(проанализированы влияния сверхтонких частиц к слипанию и налипанию на мелющие тела с точки зрения снижения затрат энергии).*

34. Тумин, А. Н. Разработка системы управления гидроприводом щековой дробилки [Текст] / А. Н. Тумин, Р. Ю. Ткачёв, **Э. П. Левченко** // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. I Международная научно-техническая интернет-конференции «Актуальные вопросы механики текучих сред», приуроченной к 60-летию образования кафедры «Гирогазодинамика» ГОУВПО Луганский национальный ун-т им. В. Даля. — № 4(6). — Ч. 2. — Луганск, 2017. — С. 110–114. *(предложен метод управления комбинированными усилиями на материал).*

35. **Левченко, Э. П.** Диспергирование материалов в разгонно-ударных машинах [Текст] / Э. П. Левченко, А. С. Панков, А. А. Бревнов и др. // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк. 2017. — С. 68–71. *(разработан научный подход к проводимым исследованиям).*

36. Власенко, Д. А. Анализ системы приготовления флюсов рациональной крупности в агломерационном производстве [Текст] / Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко** // Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов: материалы 3-й Международной научно-практической конференции. — Т. 3. — Донецк. 2017. — С. 64–67. *(выявлены недостатки нерациональной крупности флюсов на агломерационный процесс и пути устранения).*

37. Мороз, В.В. Проблемы и перспективы получения железорудного доменного агломерата товарных фракций [Текст] / В.В. Мороз, **Э.П. Левченко**, М.А. Савицкая и др. // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: статьи, тезисы докладов Международной научно-исследовательской конференции. — Трёхгорный, 2017. — С. 104–107. *(предложен способ размерной стабилизации сырья).*

38. Тумин, А. Н. Экспериментальные методы исследования процессов диспергирования в металлургии [Текст] / А. Н. Тумин, **Э. П. Левченко**, О. А. Левченко и др. // Новые материалы и перспективные технологии: четвёртый междисциплинарный научный форум с международным участием. Сборник материалов. Т. I. — М.: ООО «Буки Веди», 2018. — С. 848–851. *(путём научного анализа обоснованы методы экспериментальных исследований)*.

39. **Левченко, Э. П.** Процессы диспергирования отходов огнеупоров в условиях металлургического производства [Текст] / Э. П. Левченко, О. А. Левченко, А. М. Зинченко // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленных производств: сб. тезисов докл. III Междунар. научн.-техн. конф. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2018. — С. 12–13. *(изучено дробление огнеупоров в ДИМ с комбинированным действием на материал)*.

40. **Левченко, Э. П.** Необходимость и предложение переработки строительных отходов [Текст] / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко // Планета — наш дом: сб. материалов XII Междунар. молодёжной научной конференции. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С. 84–88. *(предложена методология переработки шлаков и вторичных материалов)*.

41. **Левченко, Э. П.** Анализ и согласование условий подачи материала в дробильно-измельчительную машину [Текст] / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019. — С. 31–34. *(теоретически изучены условия межкамерной производительности в ДИМ с комбинированным действием на материал)*.

42. Власенко, Д. А. К вопросу повышения эффективности процесса дробления твёрдого топлива в валковых дробилках [Текст] / Д. А. Власенко, **Э. П. Левченко**, Р. С. Мележик // Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГИИ», 2020. — С. 62–65. *(предложена идея повышения эффективности)*.

43. **Левченко, Э. П.** Кумуляция разрушающих усилий при диспергировании материалов в металлургии [Текст] / Э. П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Т. 3. ДонНТУ, 2020. — С. 56–61.

44. **Левченко, Э. П.** Основные направления использования накопительного энергетического эффекта при диспергировании материалов [Текст] / Э. П. Левченко // Пути совершенствования технологических

процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докл. V Междунар. науч.-тех. конф. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2020. — С. 26–30.

45. Власенко, Д. А. К вопросу уточнения систематизации валковых и роторных зубчатых дробилок [Текст] / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов: материалы 7-й Международной научно-практической конференции. — Донецк: ДонНТУ, 2021. — Т. 3 — С. 88–92. *(обоснованы методы системного подхода применительно к изучаемому вопросу)*.

46. Левченко, Э. П. Применение металлургических шлаков для нормализации кислотно-щелочного баланса водоёмов [Текст] / Э. П. Левченко, К. С. Бальбухов и др. // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докл. VI Междунар. науч.-тех. конф. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2021. — С. 195–198. *(предложена гипотеза новых путей переработки шлака и его дальнейшего использования)*.

47. Левченко, Э. П. Управление сжимающими усилиями на материал с элементами автоматизации работы толкателей дискового измельчителя [Текст] / Э. П. Левченко, Н. З. Бойко, Р. Ю. Ткачёв и др. // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации: сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции. Часть 1. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С. 174–176. *(изучены возможности автоматизации ДИМ с комбинированным действием на материал)*.

48. Левченко, Э. П. Совершенствование процесса перемещения щеки в щековой дробилке на основе гидропривода [Текст] / Э. П. Левченко, О. И. Павлиненко, А. Н. Тумин и др. // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых учёных: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С. 73–74. *(предложено сокращение времени цикла сжатия)*.

49. Левченко, Э. П. Совершенствование процессов ударного измельчения сырьевых компонентов [Текст] / Э. П. Левченко, О. В. Бревнова, А. А. Бревнов и др. // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы IV Международной науч.-практ. конф. — Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, 2022. — С. 130–134. *(обоснован подход к изучению ударного разрушения сырья)*.

50. Левченко, Э. П. Особенности и технические перспективы дисковых дробильно-измельчительных машин [Текст] / Э. П. Левченко, Д. А. Вишнеvский, О. А. Левченко и др. // 65 лет ДонГТИ. Наука и практика.

Актуальные вопросы и инновации: сборник тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции. Часть 1. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С. 111–113. *(проанализированы и обоснованы условия наложения комбинированных усилий)*.

Патенты и авторские свидетельства

51. А. с. СССР № 1551416 МПК В 02 С 7/06, В 02 С 7/08. Мельница / Косяк В. И., Ленович А. С., Ведмедева Т. Б., **Левченко Э. П.**; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4428619/31-33; заявл. 23.08.88; опубл. 23.03.90, Бюл. № 11. — 3 с.: ил. *(предложена и обоснована установка ножей в шарнирах)*.

52. А. с. СССР № 1581381 МПК В 02 С 19/00. Устройство для измельчения / Алтухов В. Н., **Левченко Э. П.**, Борисочкин Э. В., Титова А. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4646404/23-33; заявл. 02.02.89; опубл. 30.07.90, Бюл. № 28. — 2 с.: ил. *(предложено и обосновано профилирование внутренних поверхностей корпуса)*.

53. А. с. СССР № 1592039 МПК В 02 С 19/00. Устройство для измельчения твёрдого материала / Косяк В. И., **Левченко Э. П.**; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4450922/31-33; заявл. 29.06.88; опубл. 15.09.90, Бюл. № 34. — 3 с.: ил. *(предложена и обоснована жёсткая связь между плунжерами)*.

54. А. с. СССР № 1597215 МПК В 02 С 19/00. Устройство для измельчения / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Борисочкин Э. В., Титова А. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4646403/23-33; заявл. 02.02.89; опубл. 07.10.90, Бюл. № 37. — 2 с.: ил. *(предложено и обосновано наличие шнеков со взаимно противоположным направлением вращения)*.

55. А. с. СССР № 1744831 МПК В 02 С 7/12. Дробилка / Королев П. П., **Левченко Э. П.**, Онопченко А. Н.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт дробления и измельчения материалов при Коммунарском горно-металлургическом институте. — № 4870322/33; заявл. 01.08.90 (д.с.п.); — 3 с.: ил. *(предложено и обосновано наличие многоступенчатых бильных роторов)*.

56. А. с. СССР № 1620130 МПК В 02 С 7/06. Установка для тонкого измельчения материалов / Борисочкин Э. В., Алтухов В. Н., **Левченко Э. П.**, Колесникова Р. Г.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4623094/33; заявл. 20.12.88; опубл. 15.01.91, Бюл. № 2. — 3 с.: ил. *(предложено и обосновано наличие валика, эксцентрично связанного с валом своего привода)*.

57. А. с. СССР № 1625523 МПКВ 02 С 7/08. Мельница / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Борисочкин Э. В., Титова А. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4663023/33; заявл. 20.03.89; опубл. 07.02.91, Бюл. № 5. — 3 с.: ил. *(предложена и обоснована эллипсная форма размольного дискового органа).*

58. А. с. СССР № 1627246 МПК В 02 С 15/12, В 02 С 17/14. Устройство для измельчения сыпучих материалов / Борисочкин Э. В., Алтухов В. Н., **Левченко Э. П.**, Титова А. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4653108/33; заявл. 22.02.89; опубл. 15.02.91, Бюл. № 6. — 3 с.: ил. *(предложена и обоснована система регулирования междискового зазора в виде эксцентриков).*

59. А. с. СССР № 1629091 МПК В 02 С 7/14. Размольный орган мельницы / Борисочкин Э. В., Алтухов В. Н., **Левченко Э. П.**, Титова А. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4665668/33; заявл. 23.03.89; опубл. 23.02.91, Бюл. № 7. — 2 с.: ил. *(предложено и обосновано наличие планшайбы с дугообразными пазами).*

60. А. с. СССР № 1634315 МПКВ 02 С 7/08, В 02 С 7/10. Устройство для измельчения / Ульяницкий В. Н., Алтухов В. Н., **Левченко Э. П.**; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4626173/33; заявл. 27.12.88; опубл. 15.02.91, Бюл. № 10. — 2 с.: ил. *(предложена и обоснована профильная поверхность диска, контактирующая с роликами).*

61. А. с. СССР № 1636041 МПКВ 02 С 7/10. Дисковая мельница / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Борисочкин Э. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4611831/33; заявл. 02.12.88; опубл. 23.03.91, Бюл. № 11. — 2 с.: ил. *(предложено и обосновано наличие полого вала).*

62. А. с. СССР № 1644999 МПКВ 02 С 7/06. Способ измельчения материалов / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Борисочкин Э. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4682584/33; заявл. 24.04.89; опубл. 30.04.91, Бюл. № 16. — 2 с.: ил. *(предложено и обосновано изменение скоростей и направлений вращения).*

63. А. с. СССР № 1662679 МПКВ 02 С 7/08. Дисковая мельница / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Борисочкин Э. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4639654/33; заявл. 19.01.89; опубл. 15.07.91, Бюл. № 26. — 3 с.: ил. *(предложено и обосновано наличие в нижнем диске разгрузочных щелей).*

64. А. с. СССР № 1717213 МПКВ 02 С 8/00. Дробилка / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Зинченко А. М.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. —

№ 4784653/33; заявл. 18.01.90; опубл. 07.03.92, Бюл. № 9. — 3 с.: ил. *(предложено и обосновано встречное перемещение конвейерных ветвей)*.

65. А. с. СССР № 1717218 МПК В 02 С 15/12. Мельница / Борисочкин Э. В., **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Титова А. В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4789766/33; заявл. 12.02.90; опубл. 07.03.92, Бюл. № 9. — 3 с.: ил. *(предложена и обоснована необходимость тела качения для взаимодействия с профилированной поверхностью кольца)*.

66. Пат. № 52417 (Патент на полезную модель) Украина, МПК В 02 С 7/08. Устройство для измельчения материалов / **Левченко Э. П.**, Зинченко А. М., Левченко О. А., Онопченко А. Н.; заявитель и патентообладатель Донбасский государственный технический университет. — № u201002261; заявл. 01.03.10; опубл. 25.08.10, Бюл. № 16. — 3 с.: ил. *(предложена и обоснована необходимость эксцентриситета)*.

67. Пат. 54716 (Патент на полезную модель) Украина, МПК В 02 С 4/14. Мельница / **Левченко Э. П.**, Алтухов В. Н., Левченко О. А.; заявитель и патентообладатель Донбасс. гос. техн. ун-т. — № u201004440; заявл. 16.04.2010; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22. — 2 с.: ил. *(предложена и обоснована необходимость наличия конического выступа на диске)*.

68. Пат. № 87360 (Патент на полезную модель) Украина, МПК В 02 С 7/14. Диск дробильно-измельчительной машины / **Левченко Э. П.**, Алтухова Д. В., Левченко О. А., Алтухов В. Н., Вишневский Д. А.; заявитель и патентообладатель Донбасский государственный технический университет. — № u201307533; заявл. 14.06.13; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. — 5 с.: ил. *(предложена и обоснована необходимость резбь разного направления)*.

69. Пат. № 87379 (Патент на полезную модель) Украина, МПК В 02 С 7/08. Измельчитель / Алтухов В. Н., **Левченко Э. П.**, Алтухова Д. В., Левченко О. А., Вишневский Д. А.; заявитель и патентообладатель Донбасский государственный технический университет. — № u201308075; заявл. 25.06.13; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. — 5 с.: ил. *(предложена и обоснована необходимость дробильных головок и зубьев на дне чаши)*.

70. Пат. Российской Федерации на изобретение 2683547 МПК В 02 С 13/16. Способ ударного дробления в молотковой дробилке / Жильцов А. П., Власенко Д. А., **Левченко Э. П.**, Вишневский Д. А. заявитель и патентообладатель Федеральное бюдж. образ. учрежд. высш. обр. Липец. гос. техн. ун-т — № 2018116102; заявл. 27.04.2018; опубл. 28.03.2019, Бюл. № 10. — 5 с. *(обосновано воздействие суммарным импульсом нескольких молотков в ряду)*.

71. Пат. Российской Федерации на изобретение 206594 (Патент на полезную модель), МПК В 02 С 4/00. Одновалковая зубчатая дробилка / Власенко Д. А., **Левченко Э. П.**, Карпов А. В., Чижов Т. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное бюдж. образ. учрежд. высш. обр. Липец.

гос. техн. ун-т — № 2021112848; заявл. 04.05.2021; опубли. 17.09.2021, Бюл. № 26. — 5 с. (обосновано расположение зубьев на роторе).

АННОТАЦИЯ

Левченко Э.П. Научные основы диспергирования металлургического сырья и отходов в дисковых дробильно-измельчительных машинах комбинированного действия. — Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы (по отраслям). ФГБОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический университет». — Алчевск, 2023.

В диссертации разработаны научно обоснованные подходы, алгоритмы, методы анализа и синтеза дробильно-измельчительных машин с комбинированным действием на материал. Они обеспечивают решение научно-технической проблемы теоретического расчёта и проектирования оборудования для диспергирования металлургического сырья и отходов по производительности, затратам электроэнергии и фракционному составу готового продукта в одну стадию в единой конструкции машины.

Ключевые слова: дробление, измельчение, дробильно-измельчительная машина, производительность, энергозатраты, фракционный состав готового продукта.

SUMMARY

Levchenko E.P. Scientific bases of metallurgical raw materials and wastes dispersion in disk crushing and grinding machines of combined action. — Manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.02.13 - Machines, units and processes (by industry). FSBEI HE LPR "Donbass State Technical University". — Alchevsk, 2023.

The dissertation developed scientifically based approaches, algorithms, methods of analysis and synthesis of crushing and grinding machines with a combined effect on the material. They provide a solution to the scientific and technical problem of theoretical calculation and engineering of equipment for dispersing metallurgical raw materials and waste in terms of productivity, energy consumption and the fractional composition of the finished product in one stage in a single structure machine.

Key words: crushing, grinding, crushing and grinding machine, productivity, energy consumption, fractional composition of the end-product.

АВТОРЕФЕРАТ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ В ДИСКОВЫХ
ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ
КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ**

ЛЕВЧЕНКО ЭДУАРД ПЕТРОВИЧ

Подписано в печать 24.08.2023 г.
Формат 60×80. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. Л. 2,0
Тираж 100 экз. Изд. № 00000

**Издательско-полиграфический центр
Донбасского государственного технического университета**

Отпечатано с готового оригинал-макета в издательско-полиграфическом
центре
294204, г. Алчевск, ул. Фрунзе, 39. Тел. (06442) 2-58-59