

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Акимова Ольга Игоревна**

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-УДАРНОГО  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЬНОЙ  
КОЛОТОЙ ДРОБИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Алчевск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск

**Научный руководитель:** **Левченко Эдуард Петрович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный  
технический университет», профес-  
сор кафедры технологии и организации  
машиностроительного производства

**Официальные оппоненты:** **Сидоров Владимир Анатольевич**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный  
технический университет», профессор ка-  
федры механического оборудования заво-  
дов черной металлургии

**Фесенко Андрей Викторович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Луганский государственный  
аграрный университет имени  
К.Е. Вророшилова», декан инженерного  
факультета

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Луганский государственный  
университет имени Владимира Даля»

Защита состоится 15 сентября 2023 г. в 14<sup>00</sup> на заседании дис-  
сертационного совета Д 001.007.01 на базе ФГБОУ ВО «ДонГТУ» по  
адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО  
«ДонГТУ» в читальном зале по адресу: г. Алчевск, ул. Ленинградская,  
45-а, библиотека.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 001.007.01



канд. техн. наук, доц.  
Евгений Сергеевич Смекалин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время стальная колотая дробь получила широкое применение при очистке металла от ржавчины, окалины после термообработки, пригаров в литейном производстве, а также от других загрязнений и технологических дефектов, которые могут отрицательно сказаться на дальнейшей обработке изделий. На текущий момент в производстве стальной колотой дроби наибольшее распространение получили шаровые мельницы, которые в достаточной мере зарекомендовали себя с точки зрения надежности, простоты конструкции и безопасности труда. Однако данный вид мельниц обладает существенными недостатками. Так наряду со значительной металлоемкостью и существенным износом мелющих тел и футеровки, большая часть энергии при работе шаровых мельниц расходуется нерационально, что подтверждается низким коэффициентом полезного действия (от 2 до 20%). В тоже время в процессе измельчения стальной дроби в данном типе измельчительных машин происходит переизмельчение продукта вследствие его многократного соударения в рабочей камере, что существенно повышает энергозатраты на производство и сказывается на фракционном составе готовой продукции.

Большая часть исследований, направленных на изучение процесса измельчения стальной дроби, касаются его экспериментальных исследований, и в них не уделяется должного внимания имеющемуся техническому многообразию способов и средств, используемых для дробления и измельчения различных материалов.

Таким образом, необходимость разработки способа разрушения материалов прямым стесненным ударом, обоснования конструктивно-технологических параметров роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дроби с целью повышения производительности и энергоэффективности процесса является актуальной задачей, которая имеет важное научно-техническое и практическое значение.

**Степень разработанности темы.** В области исследования процессов и разработки технических средств для дробления и измельчения большой вклад внесли Андреев С.Е., Барон Л.И., Белов Н.Н., Блохин В.С., Богатов А.А., Богданов В.С., Бонд Ф., Гриффит А.А., Зверевич В.В., Кирпичев В.Л., Клушанцев Б.В., Колесников Ю.В., Косарев А.И., Кик Ф., Левченко Э.П., Линч А., Малич Н.Г., Музеймек Ю.А., Перов В.А., Серго Е.Е., Сиденко П.М., Степанов Г.В., Учитель С.А. и др. Их исследования заложили научные основы для описания процессов измельчения. Однако, несмотря на многогранность и широкий охват направлений работ, посвященных изучению и совершенствованию процессов дробления и самих дробильных машин, даль-

нейшие исследования в данной области являются немаловажной задачей как в теоретическом плане (обоснование конструктивных, эксплуатационных и энергосиловых параметров), так и в практическом плане (внедрение усовершенствованных и принципиально новых конструкций дробилок, обеспечивающих повышение их эффективности в конкретных производственных условиях).

**Объект исследования** – процесс измельчения стальной дроби в роторно-ударном измельчителе и оборудование для его реализации.

**Предмет исследования** – закономерности процесса измельчения стальной дроби стесненным ударом и основные конструктивные, энергосиловые, динамические и технологические параметры роторно-ударного измельчителя.

**Целью исследования** является разработка конструкции и обоснование технологических параметров роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дроби, включая обоснование его конструктивных, режимных и энергосиловых параметров, направленные на увеличение производительности и энергоэффективности процесса измельчения стальной дроби.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные **задачи исследования**:

1. Изучить состояние вопроса и выполнить анализ применения стальной дроби в промышленности, ее физико-химических характеристик и способов получения колотой остроугольной стальной дроби. Обосновать энергоэффективность способа разрушения стальной дроби прямым стесненным ударом.

2. Разработать принципиально новую конструкцию роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дроби, реализующего способ разрушения материала прямым стесненным ударом, а также методику проведения экспериментальных исследований процесса разрушения стальной сферической дроби прямым стесненным ударом и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя.

3. Провести математическое моделирование процесса разрушения стальной дроби свободным и стесненным ударом аналитическим и конечно-элементными методами и разработать метод обоснования конструктивных, режимных и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя в процессе разрушения стальной сферической дроби.

4. Экспериментально проверить адекватность математической модели процесса разрушения стальной сферической дроби прямым стесненным ударом и метода определения конструктивных, режимных и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя.

5. Выполнить анализ результатов исследований. Передать разработанный способ получения стальной колотой дробы и конструкцию роторно-ударного измельчителя в производство. Оценить технико-экономическую эффективность внедрения.

#### **Научная новизна полученных результатов:**

1. Впервые для условий процесса измельчения стальной сферической дробы применена модель Герца об упругом контакте простых поверхностей, на основании которой разработана математическая модель контактного взаимодействия мелющего рабочего органа с измельчаемым материалом, описывающая разрушение сферического тела под действием прямого стесненного удара.

2. Установлено, что скорость ударного контакта оказывает более существенное влияние на эффективность раскалывания стальной дробы стесненным ударом по сравнению с влиянием массы ударного элемента.

3. Впервые установлена зависимость угла, при котором начинается движение штока ударника роторно-ударного измельчителя относительно направляющих, от частоты вращения ротора, коэффициента трения скольжения для пары материалов штока и направляющих, радиусов вращения ударников в их верхнем и нижнем положениях.

4. Впервые разработан метод определения энергосиловых параметров привода роторно-ударного измельчителя для условий процесса разрушения стальной сферической дробы.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Получена математическая модель контактного взаимодействия ударника с материалом, позволяющая определить количество дробинки, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации прямого одиночного стесненного удара.

2. Предложен и запатентован принципиально новый способ разрушения материалов прямым стесненным ударом, на основании которого разработан роторно-ударный измельчитель для производства стальной колотой дробы.

3. Установлена определяющая роль влияния угловой скорости вращения ротора и коэффициента трения скольжения для пары материалов штока и направляющих на угол, при котором начинается движение штока ударника роторно-ударного измельчителя относительно направляющих ротора, позволяющий определить скорость ударного контакта ударного элемента со слоем дробы в нижнем секторе корпуса.

4. Предложенный метод определения энергосиловых параметров привода роторно-ударного измельчителя позволяет обосновать рациональную мощность электродвигателя роторно-ударного измельчителя в условиях измельчения стальной сферической дробы.

5. Практическая значимость исследования заключается в том, что применение роторно-ударного измельчителя в условиях производства стальной колотой дробы может обеспечить увеличение выхода годной продукции до 14,0 % и сократить потребление электроэнергии на производство стальной колотой дробы на 27,3–38,5 кВт/т.

6. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной сферической дробы в роторно-ударном измельчителе в условиях ООО «Завод стальной дробы» составит 1,78 млн. руб, срок окупаемости — 10,1 месяца.

#### **Методология и методы исследования.**

Для реализации целей и задач диссертационной работы проведен комплекс теоретических исследований с использованием анализа, обобщения и развития научно-технических достижений в области дробления и измельчения материалов с использованием метода конечных элементов, отдельных положений теоретической механики и физики сплошных сред и математического анализа. Экспериментальные методы исследования процесса измельчения включали физическое моделирование и проведение активных при многофакторном планировании и пассивных экспериментов. При обработке результатов проведенных лабораторных опытов применялись методы анализа и математической статистической обработки данных с использованием критериев Стьюдента, Кохрена и Фишера.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Количество раскалываемых частиц дробы при стесненном ударе находится в степенной зависимости с показателем больше единицы от скорости и с положительным показателем меньше единицы от массы ударника, что позволяет установить степень влияния скорости и массы ударника на эффективность процесса измельчения, а также обосновать параметры роторно-ударного измельчителя в процессе разрушения стальной литой дробы.

2. При значениях коэффициента трения материала ударника по материалу направляющих в диапазоне 0,12–0,3 угловая скорость вращения вала ротора роторно-ударного измельчителя для обеспечения ударного контакта в нижнем секторе корпуса может отличаться в 1,15 раза.

3. Крутящий момент и требуемая мощность привода роторно-ударного измельчителя в диапазоне углов поворота ротора роторно-ударного измельчителя от 0 до  $\pi$  может изменяться в 1,6 раза, при этом максимального своего значения мощность достигает при значении угла поворота ротора в процессе его вращения, при котором начинается движение штока ударника относительно направляющих.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы (по отраслям).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций подтверждаются приведенным объемом проанализированной и систематизированной информации о дробильно-измельчительных процессах, использованием апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью и достоверностью математических моделей, подтвержденных результатами экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных условиях, соответствием полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований (средняя относительная погрешность определения количества одновременно разрушаемой дроби составила 20,1 %, мощности привода роторно-ударного измельчителя – 3,3 %).

Основные научно-практические результаты диссертационной работы рассматривались и обсуждались на научных семинарах кафедры прикладной гидромеханики имени З.Л. Финкельштейна ФГБОУ ВО «ДонГТУ», II Международной научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия» (г. Липецк, 2016 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство» (г. Уфа, 2016 г.); Международной научно-исследовательской конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (г. Трехгорный, 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово, 2017 года); 5, 6 и 7-ой Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса» (г. Донецк, 2019, 2020 и 2021 г.); Научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2019 и 2020 г.); III-ей Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», посвященной 10-летию Металлургического института ЛГТУ, (г. Липецк, 2020 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали» (г. Алчевск, 2021 г.); Юбилейной международной научно-технической конференции «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации» (г. Алчевск, 2022 г.).

**Личный вклад автора** состоит в формировании целей и задач исследований, научных положений и выводов; разработке нового способа

и проведении теоретических исследований процесса разрушения стальной сферической дроби стесненным ударом и метода определения конструктивно-технологических параметров роторно-ударного измельчителя; изготовлении физической модели роторно-ударного измельчителя и выполнении экспериментальных исследований процесса измельчения стальной сферической дроби.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликована 1 монография, 8 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК ЛНР и РФ, получен 1 патент на изобретение. Результаты исследований опубликованы в материалах 12 научных конференций, из них 11 международных.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 126 позиций и 4 приложений. Общий объем диссертации — 174 страницы, включая 40 рисунков и 20 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается выбор темы и постановка проблемы диссертации, ее актуальность. Определены объект, предмет, цель, задачи, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования и формы их апробации.

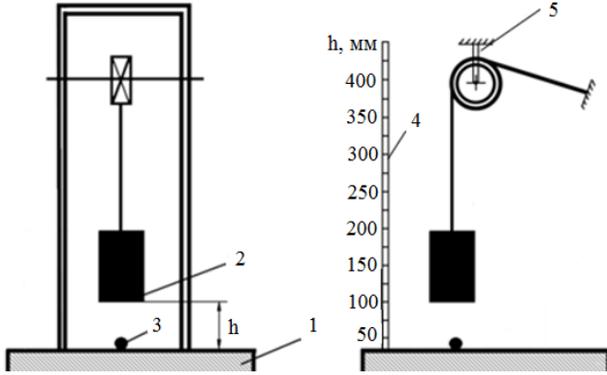
**Первый раздел** содержит результаты анализа способов получения, характеристик гранулометрического и химического состава сферической литой и остроугольной колотой стальной дроби, особенностей применения стальной дроби в промышленности. Описан принцип действия оборудования, применяемого для измельчения и фракционной подготовки стальной дроби в настоящий момент. Установлено, что применение молотковых, роторных, разгонно-ударных, валковых и щековых дробилок не соответствуют требованиям процесса изготовления колотой стальной дроби, а применяемые для этой цели шаровые мельницы обладают относительно низкой эффективностью, кроме того их использование приводит к переизмельчению продукта.

**Во втором разделе** описана последовательность проведения экспериментальных исследований процесса разрушения прямым стесненным ударом одиночных частиц и слоя стальной литой дроби и основных параметров роторно-ударной измельчительной машины.

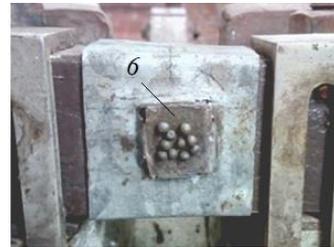
Для исследования процесса разрушения одиночных частиц дроби был изготовлен вертикальный копер с падающим грузом (см. рисунок 1). Суть проведения эксперимента заключается в определении минимальной высоты  $h$  подъема груза 2, при которой образец дроби 3,

расположенный на станине 1, разрушается под действием прямого стесненного удара, возникающего при падении груза.

Исследования процесса раскалывания слоя стальной дроби проводились на лабораторном маятниковом копре КМ-30 (см. рисунок 2, а).



1 — станина; 2 — груз; 3 — дробь; 4 — мерная линейка; 5 — блок  
Рисунок 1 — Вертикальный копер для ударного разрушения дроби



б)



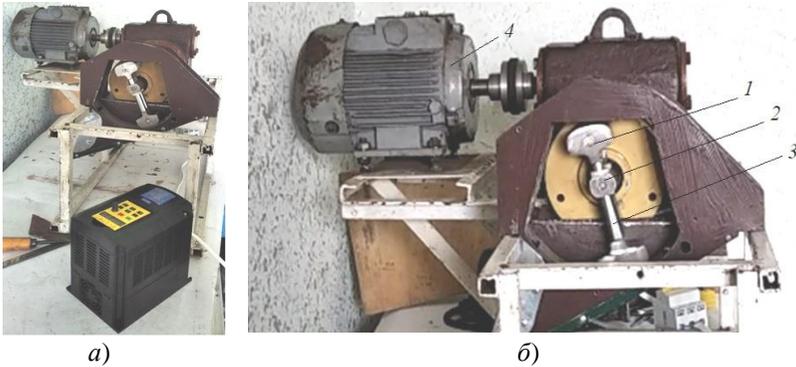
в)

Рисунок 2 — Маятниковый копер в условиях проведения эксперимента

Суть данной методики исследования процесса разрушения материалов прямым стесненным ударом заключается в определении минимальной энергии ударного контакта по шкале измерения энергии 1, размещенной на отсчетном устройстве (см. рисунок 2, в), при которой количество частиц стальной дроби, расположенной в один слой, разрушается под действием прямого стесненного удара. Слой дроби устанавливается на пластине из твердосплавного материала 6 (см. рисунок 2, б), расположенной в нижней части рамы маятникового копра 2. При этом маятник 4 поднимают до необходимого положения, затем освобождают защелку фиксатора 3 и маятник 4 свободно падает, осуществляя прямой стесненный удар молотом 5 по слою дроби.

В качестве образцов использовалась стальная дробь, производимая в ООО «ЗСД» со следующими параметрами: плотность —  $7820 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости —  $2,0 \times 10^{11} \text{ Па}$ ; предел прочности на растяжение (сжатие) —  $1020,0 \text{ МПа}$ , твердость  $450\text{--}470 \text{ HV}$ , диаметром  $1,8\text{--}2,9 \text{ мм}$ .

Описана методика экспериментальных исследования процесса измельчения дроби и обоснования основных параметров измельчительной машины, для которых изготовлена установка, включающая в себя физическую модель роторно-ударного измельчителя (см. рисунок 3, б), инвертора и цифрового многофункционального реле (см. рисунок 3, а).



1 — ударник; 2 — ротор; 3 — шток; 4 — приводной электродвигатель  
Рисунок 3 — Установка для проведения экспериментальных исследований роторно-ударного измельчителя

Мощность для установившегося режима измельчителя определялась как сумма мощностей холостого хода и затрачиваемой на преодоление момента сопротивления в процессе измельчения дроби:

$$W = W_{\text{comp}} + W_{\text{x.x.}} \frac{\omega_i}{\omega_n}, \quad (1)$$

где  $W_{сопр}$  — мощность, затрачиваемая на преодоление момента сопротивления, Вт;  $W_{х.х.}$  — мощность холостого хода, Вт;  $\omega_i$  — угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с;  $\omega_n$  — угловая скорость вращения вала при определении мощности холостого хода, рад/с.

Угловые скорости вращения определялись по зависимости:

$$\omega_i = \frac{\pi n_{об}}{30}, \quad (2)$$

где  $n_{об}$  — число оборотов вала приводного электродвигателя, об/мин.

В качестве метода проведения эксперимента использовалось центральное композиционное ротатабельное униформпланирование второго порядка.

При определении мощности роторно-ударного измельчителя в процессе измельчения дробы в качестве факторов варьирования выбирались масса ударника  $m_m$  и частота вращения ротора  $\omega$  (см. таблицу 1).

Таблица 1 — Интервалы варьирования факторов

	$x_1(m_m)$ , кг	$x_2(\omega)$ , рад/с
Основной уровень, $x_i = 0$	1,88	6,1
Интервал варьирования, $I$	0,18	0,98
Верхний уровень, $x_i = +1$	2,06	7,08
Нижний уровень, $x_i = -1$	1,7	5,12
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	2,14	7,49
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	1,62	4,71

Число опытов (при доверительной вероятности 0,95 и допустимой ошибке  $\varepsilon = \pm 3\sigma$ ) принималось трехкратным.

**В разделе 3**, используя метод конечных элементов, проведено моделирование процесса ударного нагружения сфероидного тела, с помощью которого установлено, что обеспечить разрушение стальной дробы при ее свободном ударе о преграду при скоростях до 150 м/с невозможно. При этом моделирование стесненного удара «молотом» по дробе на «наковальне» методом конечных элементов верифицировало предположение о целесообразности разработки роторно-ударного измельчителя, в основу которого заложен предложенный способ разрушения материалов прямым стесненным ударом.

В результате усовершенствования модели Герца об упругом контакте простых поверхностей была получена зависимость для определения количества дробы, одновременно разрушаемой одиночным прямым стесненным ударом, имеющая следующий вид:

$$N_{op} = 7,42 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt[5]{(V^2 m_m \Theta^4 R_{np}^3)^3}}{\sigma_{дин}^3}, \quad (3)$$

где  $V$  — скорость ударника, м/с;  $m_m$  — масса ударника, кг;  $\Theta$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материалов;  $R_{np}$  — приведенный радиус кривизны поверхности ударника и дроби;  $\sigma_{дин}$  — динамический предел прочности дроби, МПа.

Коэффициент  $\Theta$  определяется из выражения:

$$\Theta = \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_1^2) - E_2 (\mu_2^2 - 1)}, \quad (4)$$

где  $E_1, E_2$  — модули упругости материалов ударника и дроби соответственно, МПа;  $\mu_1, \mu_2$  — коэффициенты Пуассона материалов.

Приведенный радиус  $R_{np}$  определяется с помощью зависимости:

$$R_{np} = \frac{r R_1}{r + R_1}, \quad (5)$$

где  $r$  — радиус дробинки, м;  $R_1$  — радиус ударника, м.

На рисунке 4 отображены графики зависимости количества расколотых дробинок от массы и скорости ударника с фиксированными значениями  $V = 3$  м/с и  $m_m = 100$  кг.

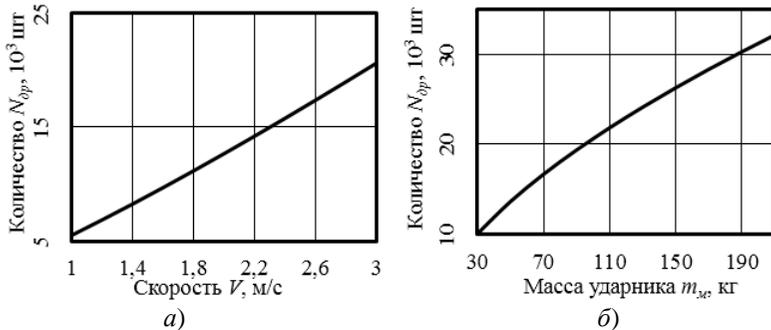


Рисунок 4 — Графики зависимостей количества дроби, раскалываемой одиночным ударом: а — при фиксированном значении массы ударника; б — при фиксированном значении скорости ударника

Из анализа графических зависимостей установлено, что скорость ударника влияет на количество раскалываемой дроби в степенной зависимости с показателем больше единицы, а масса ударника — в степен-

ной зависимости с положительным показателем меньше единицы, что говорит о том, что скорость оказывает более существенное воздействие на эффективность раскалывания дробы стесненным ударом по сравнению с массой ударника.

Для обоснования основных параметров процесса ударного контакта, требующихся для обеспечения разрушения дробы при стесненном ударе в роторно-ударном измельчителе, разработаны следующие зависимости:

– для определения требуемой массы ударника:

$$m'_M = \frac{3,6 \cdot 10^3 (\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{V^2 R_{np}^3}; \quad (6)$$

– для определения необходимой скорости ударника:

$$V = 59,6 \sqrt{\frac{(\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{m_M R_{np}^3}}. \quad (7)$$

На основании методики расчета шлюзового питателя для подачи дробы в роторно-ударный измельчитель установлено, что для стабильного обеспечения его работоспособности при его производительности 1,0 т/ч требуется мощность привода питателя порядка 2,0 кВт.

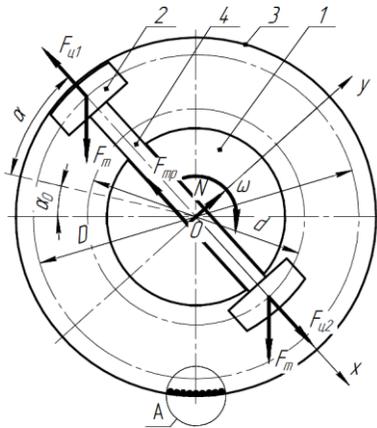


Рисунок 5 — Динамическая модель роторно-ударного измельчителя

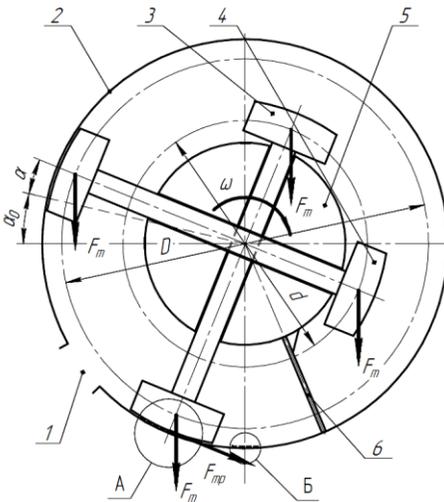
Разработана математическая модель роторно-ударного измельчителя в процессе измельчения стальной сферической дробы, схема которого представлена на рисунке 5.

Динамическая модель роторно-ударного измельчителя 3 описана с помощью дифференциального закона механического движения, на основе которой получена зависимость угла положения ротора 1 роторно-ударного измельчителя, при котором начинается движение ударника 2 относительно направляющих 4:

$$\alpha_0 = 2 \arctan \left( \frac{\sqrt{4g^2 \cdot (1 + f_1^2) - \omega^4 (R - r)^2 - 2g}}{2f_1g + \omega^2 (r - R)} \right), \quad (8)$$

где  $f_1$  — коэффициент трения пары материалов штока и направляющих;  $\omega$  — угловая скорость ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$ ,  $r$  — радиусы вращения ударника в верхнем и нижнем положениях соответственно, м.

Установлено, что в диапазоне коэффициентов трения пары материалов ударника и направляющих 0,12...0,3 угловая скорость вращения ротора для обеспечения ударного контакта в нижнем секторе корпуса может отличаться в 1,15 раза, что сказывается на производительности измельчителя. При этом коэффициент трения пары материалов штока и направляющих и угловая скорость вращения ротора, фактически не влияют на линейную скорость ударного контакта ударника и дробы.



1 — выгрузное отверстие; 2 — корпус, 3, 4 — ударники; 5 — ротор; 6 — скребок

Рисунок 6 — Схема роторно-ударного измельчителя

Используя дифференциальное уравнение движения механической системы (уравнение Лагранжа II-ого рода) была разработана математическая модель привода роторно-ударного измельчителя (см. рисунок 6), с помощью которой получены зависимости крутящего момента на валу ротора в процессе измельчения дробы от радиусов вращения ударников в их верхнем  $R$  и нижнем  $r$  положениях, угловой скорости вращения ротора  $\omega$  и коэффициента трения пары материалов направляющих и штока ударника  $f_2$ :

$$M_p = -m_m g \times [(r - R)(\cos \alpha + \sin \alpha) - 2Rf_2 \cos \alpha], \text{ если } \alpha \leq \alpha_0;$$

$$M_p = -m_m g [(r - R + 2x(\alpha))\cos \alpha - (R - r)\sin \alpha - 2Rf_2 \cos \alpha], \text{ если } \alpha \geq \alpha_0. \quad (9)$$

где  $\alpha$  — угол поворота ротора, рад.

Мощность двигателя роторно-ударного измельчителя находится как:

$$W_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{кр}} \cdot \omega}{\eta_{\text{пр}}} \quad (10)$$

где  $M_{\text{кр}}$  — крутящий момент, Н·м;  $\eta_{\text{пр}}$  — КПД привода.

Крутящий момент определяется как:

$$M_{кр} = M_p + M_{тр.п.} \quad (11)$$

где  $M_{тр.п.}$  — момент от сил трения в подшипниках ротора, Н·м.

График зависимости крутящего момента от угла положения ротора в процессе измельчения стальной дроби представлен на рисунке 7.

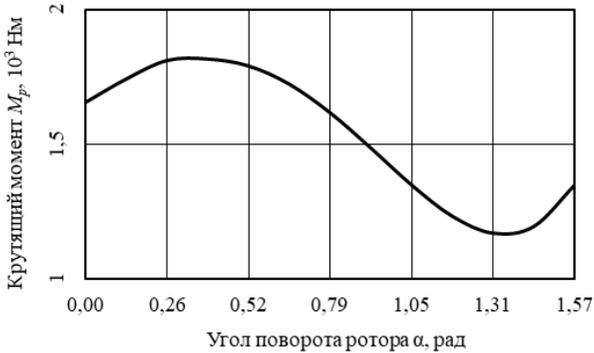


Рисунок 7 — График зависимости крутящего момента

Установлено, что в диапазоне углов поворота ротора от 0 до  $\pi$ , момент сопротивления и требуемая мощность привода измельчителя изменяется в 1,6 раза, при этом максимального значения достигает при значении угла поворота ротора  $\alpha_0$ .

На основании проведенных теоретических исследований представлены рекомендации в виде конструктивно-технологических, энергосиловых и эксплуатационных параметров роторно-ударного измельчителя в процессе дробления стальной сферической дроби (см. таблицу 2).

Таблица 2 — Рекомендуемые конструктивно-технологические параметры роторно-ударного измельчителя

Параметр	Материал направляющих		
	Бронза	Сталь	Чугун
Коэффициент трения $f_2$	0,12	0,15	0,3
Радиус внешнего положения ударника, м	1,05		
Радиус внутреннего положения ударника, м	0,3		
Угловое положение ротора $\alpha_0$ , рад	0,25	0,28	0,42
Угловая скорость вращения ротора, $c^{-1}$	2,1	2,0	1,83
Расчетная скорость ударного контакта, м/с	3,7	3,67	3,62
Производительность измельчителя, т/ч	1,05	1,0	0,9
Мощность электродвигателя привода, кВт	17,2		

В разделе 4 отображены результаты экспериментальных исследований процесса разрушения дробы прямым стесненным ударом и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя.

Графики зависимостей энергии удара и энергозатрат при разрушении дробы от ее диаметра отображены на рисунке 8.

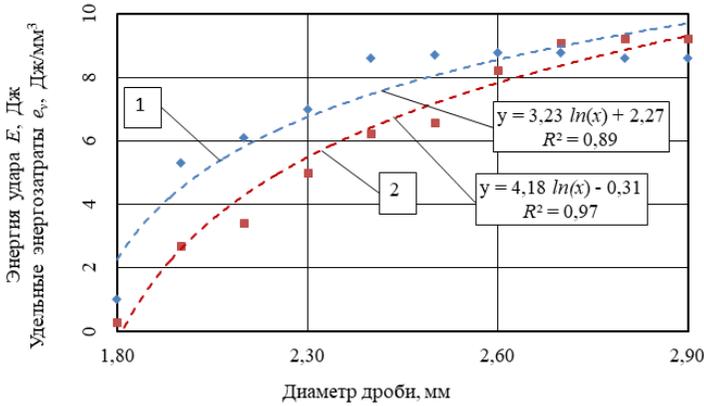


Рисунок 8 — Графики зависимостей энергии удара (1) и энергозатрат (2) при разрушении дробы от ее диаметра

На основании результатов экспериментальных исследований, построены графические зависимости количества дробы диаметром 2,3 мм (см. рисунок 9, а) и 2,8 мм (см. рисунок 9, б), разрушаемой прямым стесненным ударом молота маятникового копра от его скорости.

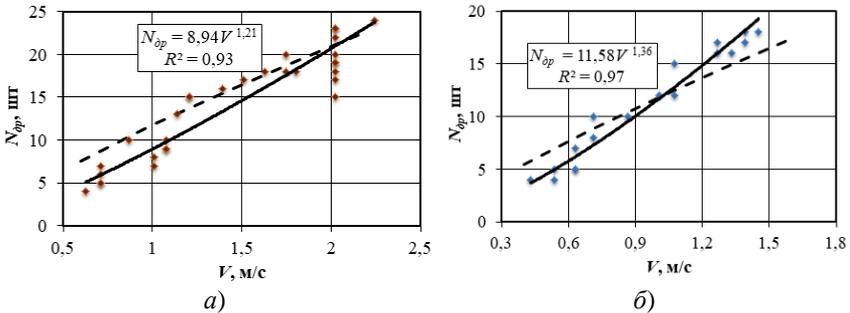


Рисунок 9 — Графики зависимостей количества дробы, разрушаемой одиночным ударом молота маятникового копра от его скорости

Средняя относительная погрешность определения количества дробы разрушаемых стесненным ударом по зависимости (3) составила 20,1 %

по сравнению с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований, а адекватность математической модели — 79,9 %.

Результаты моделирование процесса измельчения дробы в физической модели роторно-ударного измельчителя представлены в виде функции отклика мощности привода:

$$y(x_1, x_2) = 4,53x_1 + 25,13x_2 + 0,17x_1^2 + 0,17x_2^2 - 1,25x_1x_2 + 145,03 \quad (12)$$

При статистической обработке результатов, критерии Кохрена и Фишера составили  $F_{K_1} = 5,12$ ,  $F_{\phi_1} = 6,29$ , что подтверждает достоверность регрессионной модели и адекватность математической модели.

В натуральном виде зависимость (12) принимает следующий вид:

$$W = 48,2m_m + 36,51\omega + 4,97m_m^2 + 0,17\omega^2 - 6,93m_m\omega - 112,9 \quad (13)$$

С целью подтверждения адекватности разработанной математической модели необходимой мощности привода роторно-ударного измельчителя проведен сравнительный анализ значений, полученных по аналитическое формуле (10) и регрессионной зависимости (13). Относительная погрешность аналитического метода составила 3,3 %.

Экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной дробы в условиях ООО «ЗСД» обоснован в разделе 5 и составил 1780800 руб, а срок окупаемости — 10,1 месяца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основе впервые установленных закономерностей и параметров процесса раскалывания стальной дробы стесненным ударом решена актуальная научно-техническая задача прогнозирования основных технико-эксплуатационных показателей работы роторно-ударного измельчителя, что дает возможность повысить эффективность процесса измельчения стальной дробы, а также снизить энергозатраты.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Рассмотрены особенности применения стальной дробы в промышленности, ее разновидности. Установлено, что остроугольная стальная дробь имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами абразивной обработки поверхностей металлических изделий. Анализ исследований показал: применение молотковых, роторных, разгонно-ударных, валковых и щековых дробилок не соответствуют технико-технологическим требованиям процесса изготовления колотой стальной дробы, а используемые в данное время шаровые мельницы обладают относительно невысокой эффективностью (коэффициент полезного действия не превышает 20 %) и их использование в условиях производства остроугольной дробы приводит к переизмельчению продукта.

Установлено, что наиболее рациональным условием создания разрушающих усилий является реализация прямого стесненного удара.

2. Разработаны принципиально новая конструкция роторно-ударного измельчителя, обеспечивающего энергоэффективное раскалывание стальной дробы сферической формы, за счет реализации способа разрушения «молот по наковальне» и методика проведения экспериментальных исследований процесса разрушения материала прямым стесненным ударом по определению затрачиваемой энергии для раскалывания одиночных частиц и слоя стальной дробы. Для проведения экспериментальных исследований процесса разрушения дробы и обоснования основных конструктивно-технологических параметров измельчительной машины изготовлена физическая модель роторно-ударного измельчителя.

3. В результате проведения теоретических исследований получена усовершенствованная модель Герца об упругом контакте простых поверхностей, на основании которой предложена зависимость для определения максимального количества дробин, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации прямого одиночного стесненного удара. На основании дифференциального закона механического движения разработана зависимость угла положения вала ротора роторно-ударного измельчителя, при котором начинается движение штока ударника относительно направляющих при вращении ротора. На основании дифференциального уравнения движения механической системы (уравнения Лагранжа II-ого рода) разработан метод обоснования энергосиловых параметров привода роторно-ударного измельчителя, на основании которого получены зависимости момента сопротивления на валу и требуемой мощности привода измельчительной машины в процессе разрушения стальной сферической дробы.

4. Экспериментально подтверждена адекватность разработанной математической модели процесса ударного контакта мелющих тел с дробимым материалом при прямом стесненном ударе и метода расчета мощности привода измельчительной машины. Средняя относительная погрешность результатов аналитических методов и зависимостей не превысила 20,1 % по сравнению с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований.

5. В результате проведенного анализа с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что:

– обеспечить разрушение стальной дробы при ее свободном ударе о неподвижную преграду в диапазонах скоростей до 150 м/с (при которых происходит ударное взаимодействие материала с рабочими органами и плитами в молотковых, роторных и разгонно-ударных дробилках) не

возможно, что свидетельствует о необходимости разработки конструкции нового роторно-ударного измельчителя, в котором процесс измельчения материала основан на реализации стесненного удара;

- скорость ударного контакта влияет на количество раскалываемой дроби в степенной зависимости с показателем больше единицы, а масса ударника — в степенной зависимости с положительным показателем меньше единицы, что говорит о том, что скорость удара оказывает более существенное воздействие на эффективность раскалывания дроби по сравнению с массой ударника;

- в диапазоне коэффициентов трения материала ударника по материалу направляющих  $0,12-0,3$  угловая скорость вращения вала роторно-ударного измельчителя для обеспечения ударного контакта в нижнем секторе корпуса может отличаться в  $1,15$  раза, что указывает, что для повышения производительности машины в качестве материала направляющих необходимо выбирать материал с наиболее низким значением коэффициента трения по стали;

- коэффициент трения материалов штока и направляющих, а также угловая скорость вращения ротора, обеспечивающие условие удара в необходимом секторе рабочей камеры, фактически не влияют на линейную скорость ударного взаимодействия ударника и дроби;

- в диапазоне углов поворота ротора роторно-ударного измельчителя от  $0$  до  $\pi$ , момент сопротивления и требуемая мощность привода измельчителя может изменяться в  $1,6$  раза, при этом максимального своего значения мощность достигает при значении угла поворота ротора, при котором начнется движение штока ударника относительно направляющих ротора при его вращении;

- применение роторно-ударного измельчителя в условиях производства стальной колотой дроби может обеспечить увеличение выхода годной продукции до  $14\%$  и сократить потребление электроэнергии не только на измельчительные процессы в шаровых мельницах, но и на выплавку стали для получения исходной дроби круглой формы.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной дроби в условиях ООО «ЗСД» составит  $1780800$  руб, срок окупаемости —  $10,1$  месяца.

Разработаны практические рекомендации по выбору конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя для условий процесса дробления стальной сферической дроби в условиях ООО «Завод стальной дроби».

Перспективами дальнейшей разработки темы могли бы быть развитие теории расчета технико-эксплуатационных параметров роторно-ударных дробильно-измельчительных машин, а также адаптация разра-

ботанных в исследовании методов и зависимостей для различных конструкций дробилок и измельчителей данного типа, применяемых в различных отраслях народного хозяйства.

### **Основные научные публикации по теме**

#### **диссертационного исследования**

#### ***Монографии, брошюры, учебники и учебные пособия***

1. Павлиненко, О. И. Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах: монография / Э. П. Левченко [и др.] // — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 225 с.

#### ***Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при МОН Луганской Народной Республики***

2. Павлиненко, О. И. Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дробы / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, В. Г. Чебан // Вестник ДонНТУ. Специальный выпуск «Металлургические процессы и оборудование» — Донецк : ДонНТУ, 2016. — № 4 (4). — С.38-44.

3. Павлиненко, О. И. Повышение эффективности процесса раскалывания стальной дробы в шаровой мельнице / О. И. Павлиненко [и др.] // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — Вып. 5 (48). — С.86-91.

4. Павлиненко, О. И. Экспериментальные исследования энергозатрат на раскалывание стальной дробы прямым стесненным ударом / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — Вып. 8 (51). — С.145-151.

5. Павлиненко, О. И. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторной ударной мельницы для производства колотой дробы / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — № 4 (18). — С.3-9.

6. Павлиненко, О. И. Аналитические приемы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дробы стесненным ударом / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 15 (58). — С.106-112.

7. Павлиненко, О. И. Анализ параметров процесса раскалывания стальной сферической дробы стесненным центральным ударом / О. И. Павлиненко [и др.] // Черные металлы. — М. : АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 2020. — № 8 (1064). — С.29-33.

8. Павлиненко, О. И. Определение мощности привода роторного ударного измельчителя для производства стальной колотой дробы /

О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — Вып. 19 (62). — С.86-93.

9. Павлиненко, О. И. Обоснование основных параметров роторно-ударного измельчителя, реализующего условия стесненного удара / О. И. Павлиненко [и др.] // Сборник научных трудов ДонГТИ. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — Вып. 22 (65). — С.100-105.

### *Патенты*

10. Патент №2729155 Российская Федерация, МПК В02С 17/00 (2006.01). Способ разрушения материалов стесненным ударом / Павлиненко О. И., Жильцов А. П., Чебан В. Г., Левченко Э. П., Власенко Д. А., Левченко О. А; заявитель и патентообладатель ЛГТУ. — № 2729155; заявл. 02.09.19; опубл. 04.08.20, Бюл. № 22. — 6 с.: ил.

### *Публикации апробационного характера, доклады на научных конференциях и другие научные публикации*

11. Павлиненко, О. И. Пути повышения эффективности процесса производства колотой стальной дробы / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, Д. А. Вишневский // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов II международной научно-практической конференции, 23-25 ноября 2016 г. — Липецк : ЛГТУ, 2016. — С.211-215.

12. Павлиненко, О. И. Перспективы использования некруглых многоугольных мелющих тел в барабанных мельницах / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Т. 1, 16 декабря 2016 г. — Уфа : Изд-во «Нефтегазовое дело», 2016. — С.392-393.

13. Павлиненко, О. И. Повышение эффективности раскалывания стальной дробы стесненным ударом / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, М. А. Савицкая // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: статьи, тезисы докладов Международной научно-исследовательской конференции, 17 марта 2017 г. — Трехгорный : ТТИ НИЯУ «МИФИ», 2017. — С.108-111.

14. Павлиненко, О. И. Оценка возможностей приготовления колотой дробы на основе инновационных подходов / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов Международной научно-практической конференции, 29-30 ноября 2017 г. — Кемерово : ФГБОУ ВО «КГТУ им. Т. Ф. Горбачева», 2017 — С.359-362.

15. Павлиненко, О. И. Процесс разрушения стальной дробы центральным стесненным ударом / О. И. Павлиненко [и др.] // Инновационные

перспективы Донбасса: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Т.3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, 21-23 мая 2019 г. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — С.104-108.

16. Павлиненко, О. И. Процесс разрушения стальной дроби на маятниковом копре / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов научно-практической конференции, 19 марта 2019 г. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — С.27-29.

17. Павлиненко, О. И. Приготовление остроугольной стальной дроби методом разрушения «молот по наковальне» / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, 21-23 октября 2020 г. — Липецк : ЛГТУ, 2020. — С.134-139.

18. Павлиненко, О. И. Основные конструктивно-технологические параметры роторно-ударного измельчителя / О. И. Павлиненко [и др.] // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. Т.3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, 26-28 мая 2020 г. — Донецк : ДонНТУ, 2020. — С.110-115.

19. Павлиненко, О. И. Современные решения проблемы раскалывания стальной дроби / О. И. Павлиненко [и др.] // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции, 19 марта 2020 г. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С.28-30.

20. Акимова, О. И. Проблемы и перспективы приготовления остроугольного стального абразива путем раскалывания литой сферической дроби / О. И. Акимова, Э. П. Левченко // Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции, 20 мая 2021 г. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С.60-62.

21. Павлиненко, О. И. Физическое моделирование ударно-роторного измельчителя / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, О. А. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса: Материалы 7-й Международной научно-практической конференции. Т.3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов, 24-26 мая 2021 г. — Донецк : ДонНТУ, 2021. — С.37-41.

22. Акимова, О. И. Преимущества раскалывания стальной дроби прямым стесненным ударом / О. И. Акимова, Э. П. Левченко // «65 лет ДонГТИ. Наука и практика. Актуальные вопросы и инновации» сборник

тезисов докладов юбилейной международной научно-технической конференции, 13-14 октября 2022 г. Часть 1. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — С.120-122.

**Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:**

[1,5,15-17,21] – разработка физической модели, проведение экспериментальных исследований и обработка результатов; [2-4,11-14] – анализ существующих способов и средств получения стальной колотой дроби; [6,7] – моделирование процесса раскалывания стальной дроби; [8-10,18-20,22] – разработка математической модели роторно-ударного измельчителя, определение конструктивных, технологических и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя.

### АННОТАЦИЯ

**Акимова О. И. Разработка конструкции и обоснование технологических параметров роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дробы.** – Рукопись.

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

В диссертационной работе изложены результаты исследований процесса разрушения материалов стесненным ударом, обоснования закономерностей и разработки методик определения конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя в процессе раскалывания стальной сферической дробы.

Определено влияние наиболее значимых факторов на основные технико-эксплуатационные параметры процесса измельчения сферической стальной дробы. Получены зависимости: количества дробинки в слое, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации прямого одиночного стесненного удара; угла положения вала ротора роторно-ударного измельчителя, при котором начинается движение штока ударника относительно направляющих при вращении ротора; момента сопротивления на валу и требуемой мощности электродвигателя машины в процессе измельчения стальной сферической дробы.

Экспериментально подтверждена адекватность разработанной математической модели процесса ударного контакта мелющих тел с дробимым материалом при стесненном ударе и метода расчета мощности электродвигателя привода роторно-ударного измельчителя.

Разработаны рекомендации по выбору конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-ударного из-

мельчителя для условий процесса дробления стальной сферической дроби в условиях ООО «Завод стальной дроби».

Результаты исследования изложены в 22 научных публикациях.

**Ключевые слова:** измельчение, стесненный удар, роторно-ударный измельчитель, стальная сферическая дробь, конструктивно-технологические параметры, энергосиловые параметры.

### SUMMARY

**Akimova O. I. Development of the design and feasibility demonstration of technological parameters of a rotary impact shredder for the production of steel crushed shot.** – Manuscript.

Dissertation for the Candidate's of Technical Sciences Degree in the specialty 05.02.13 — Machines, aggregates and processes (by industry) — FSEI HE «Donbass State Technical University». — Alchevsk, 2023.

The dissertation work presents the results of studies of the process of destruction of materials by constrained impact, substantiation of regularities and development of methods for determining the structural-technological and energy-power parameters of a rotary impact shredder in the process of splitting steel spherical shot.

The influence of the most significant factors on the main technical and operational parameters of the process of splitting spherical steel shot is determined. The dependences obtained: the number of pellets in the layer, at which their splitting is ensured during the implementation of a direct single constrained impact; the angle of the rotor shaft of the rotary impact shredder, at which the movement of the striker rod relative to the guides begins when the rotor rotates; the moment of resistance on the shaft and the required power of the electric motor of the machine during the grinding of steel spherical shot.

The feasibility of the developed mathematical model of the process of impact contact of grinding media with crushed material with a constrained impact and the method of calculating the power of the electric motor drive of the rotary impact shredder has been experimentally confirmed.

Recommendations for the selection of structural, technological and energy-power parameters of a rotary impact grinder for the conditions of the crushing process of steel spherical shot in the conditions of LLC «Steel Shot Plant» have been developed.

The results of the research are presented in 22 scientific publications.

**Key words:** grinding, constrained impact, rotary impact shredder, steel spherical shot, structural-technological parameters, energy-power parameters.