

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)

**Диссертация**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Левченко Эдуард Петрович  
к.т.н., доцент

Идентичность всех экземпляров  
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ  
Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 001.007.01, к.т.н., доцент

Е.С. Смекалин

Алчевск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА КРУГЛОЙ И ОСТРОУГОЛЬНОЙ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ДРОБЛЕНИЯ .....	13
1.1 Особенности применения абразивной очистки изделий в промышленности, разновидности стальной дроби .....	13
1.2 Способы получения, характеристики гранулометрического и химического состава стальной дроби .....	20
1.3 Анализ способов дробления материалов и машин для приготовления колотой дроби .....	29
1.4 Теоретические аспекты процессов дробления и измельчения материалов .....	38
1.4.1 Основные законы дробления и измельчения .....	38
1.4.2 Особенности разрушения материалов ударом.....	40
Выводы к разделу 1.....	45
РАЗДЕЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ И ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ .....	47
2.1 Описание методик экспериментальных исследований процесса измельчения стальной дроби стесненным ударом .....	48
2.1.1 Методика и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях процесса раскалывания одиночных частиц стальной дроби .....	48
2.1.2 Методика и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях процесса раскалывания слоя стальной дроби .....	51

2.2 Методика и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях процесса измельчения дробы в роторно-ударном измельчителе.....	55
2.2.1 Определение критериев подобия физической модели и природы роторно-ударного измельчителя.....	55
2.2.2 Физическая модель роторно-ударного измельчителя и описание технических характеристик дробы.....	60
2.2.3 Тиристорный электропривод трехфазного переменного тока в условиях проведения эксперимента.....	65
2.2.4 Описание способа определения мощности привода роторно-ударного измельчителя в установившемся режиме.....	68
2.2.5 Методика проведения экспериментальных исследований процесса измельчения стальной дробы в роторно-ударном измельчителе.....	69
Выводы к разделу 2.....	77
<b>РАЗДЕЛ 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ.....</b>	<b>79</b>
3.1 Особенности реализации свободного и стесненного удара в дробильно-измельчительных процессах.....	79
3.2 Моделирование процесса разрушения стальной сферической дробы различными видами ударного контакта.....	81
3.2.1 Конечно-элементное моделирование процесса свободного ударного контакта стальной дробы о неподвижную преграду.....	81
3.2.2 Конечно-элементное моделирование процесса разрушения стальной дробы в условиях стесненного удара «молот по наковальне».....	84
3.3 Структурный анализ роторно-ударного измельчителя.....	86

3.4 Математическая модель процесса ударного контакта мелющих тел с дробимым материалом.....	87
3.5 Определение основных параметров подачи исходного сырья в рабочую камеру шлюзовым питателем .....	96
3.6 Математическое моделирование роторно-ударного измельчителя.....	102
3.6.1 Динамическая модель мелющих тел в рабочем пространстве роторно-ударного измельчителя .....	102
3.6.2 Разработка метода обоснования энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя .....	114
3.7 Математическое моделирование выгрузки готового продукта из измельчителя .....	126
3.8 Рекомендации по выбору конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя для условий процесса дробления стальной сферической дроби в условиях ООО «Завод стальной дроби».....	128
Выводы к разделу 3.....	129
<b>РАЗДЕЛ 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ДРОБИ СТЕСНЕННЫМ УДАРОМ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ .....</b>	<b>133</b>
4.1 Экспериментальное исследование процесса раскалывания единичной частицы дроби прямым стесненным ударом.....	133
4.2 Экспериментальное исследование процесса раскалывания слоя дроби прямым стесненным ударом.....	135
4.3 Экспериментальное обоснование метода определения конструктивных параметров роторно-ударного измельчителя .....	140
Выводы к разделу 4.....	145
<b>РАЗДЕЛ 5 ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ .....</b>	<b>146</b>

Выводы к разделу 5.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационной работы в производство.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс .....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ В Расчет экономического эффекта результатов диссертационной работы.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Конструкция и параметры роторно-ударного измельчителя .....	174

## ВВЕДЕНИЕ

**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, дальнейшие 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 дробы в роторно-ударном измельчителе и оборудование для его реализации.

**Предмет исследования** – закономерности процесса измельчения стальной дробы 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 дробы, включая обоснование его конструктивных, режимных и энергосиловых параметров, направленные на увеличение производительности и энергоэффективности процесса измельчения стальной дробы.

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

1. Изучить состояние вопроса и выполнить анализ применения стальной дробы в промышленности, ее физико-химических характеристик и способов полу-

чения 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 дроби и конструкцию роторно-ударного измельчителя в производство. Оценить технико-экономическую эффективность внедрения.

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

1. Впервые для условий процесса измельчения стальной сферической дроби 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 дроби 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 дроби.

#### **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 дроби.

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 дроби 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 дроби.

5. Практическая значимость исследования заключается в том, что применение роторно-ударного измельчителя в условиях производства стальной колотой дроби может обеспечить увеличение выхода годной продукции до 14,0 % и сокра-

тить потребление электроэнергии на производство стальной колотой дроби на 27,3–38,5 кВт/т.

6. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной сферической дроби в роторно-ударном измельчителе в условиях ООО «Завод стальной дроби» 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 дроби 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 дроби.

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.

**РАЗДЕЛ 1****СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА КРУГЛОЙ И ОСТРОУГОЛЬНОЙ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ДРОБЛЕНИЯ****1.1 Особенности применения абразивной очистки изделий в промышленности, разновидности стальной дроби**

Начиная с развития промышленных технологий и по настоящее время весьма актуальной остается задача качественной и быстрой очистки поверхностей разнообразных металлических изделий от окалины, образовавшейся в результате термической обработки, остатков литниковых систем и пригаров после литья, коррозии, а также иных дефектов, оказывающих весьма негативное влияние при последующей обработке деталей и ухудшающих их внешний вид и полезные свойства.

Изначально в 20-х годах XIX века использовалась технология пескоструйной очистки изделий, где в качестве активной абразивной среды выступал обычный речной песок [0]. Основным негативным фактором при этом является увеличенная концентрация оксида кремния воздушной среды в рабочей зоне, что служит причиной силикоза, как одного из серьезных профессиональных заболеваний на производстве [2].

В связи с этим, начиная с 30-х годов XX века, была предложена технология, где вместо речного песка в качестве абразива может выступать металлическая дробь, например, изготовленная из чугуна, методом распыления расплавленного металла в водную среду [3]. К основным преимуществам такого абразива относятся:

- постоянство физических и химических свойств (твердость, фракционный состав и прочее);
- повышенное число циклов работы (до 10);
- значительное снижение концентрации пыли в рабочей зоне;

- безвредность для оператора дробеструйной установки;
- широкая область применения (от деталей небольших габаритов и веса до деталей, характеризующихся повышенными габаритными размерами и тоннажем).

С дальнейшим развитием технологий существенным образом возросли и требования, предъявляемые к металлическим материалам применимым в качестве абразивов, что вызвало необходимость замены чугунной дроби на стальную дробь. В первую очередь это было вызвано тем, что сталь характеризуется сравнительно более прочной структурой, и тем самым обеспечивается расширенный диапазон изменения физико-механических свойств дроби, а, следовательно, и сфера ее применения.

В настоящее время в качестве технологической очистки изделий стальной дробью выступает дробеметная и дробеструйная обработка, позволяющая производить очистку деталей имеющих значительное разнообразие, как форм, так и размеров (см. рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 — Примеры качества поверхности изделий до и после дробеструйной обработки

При этом изделие помещается в рабочую зону дробеструйной машины, где посредством дробеметной турбины обрабатывается кучным потоком стальной дроби, массовая доля которой может варьироваться в диапазоне от 60 до

1200 кг/мин. Повышенная интенсивность воздействия на материал и высокая производительность обеспечивают эффективное выполнение обработки металлопроката, сварных швов и конструкций, отливок, штамповок, кованных и иных изделий от ржавчины, окалины, заусенцев, песка и т.д.

С учетом размеров и способов подачи деталей на обработку могут применяться и разнообразные варианты дробеметных устройств, начиная от достаточно простых конструкций с фиксированным или поворотным столом до установок с элементами частичной или полной автоматизации, в том числе с числовым программным управлением, а также снабженных промышленным роботизированным комплексом или манипулятором в условиях крупносерийного производства, например для автомобильных компонентов, а также установок рольгангового типа, применяемых для удобства очистки металлоконструкций.

Основным эффектом, обеспечиваемым дробеструйным воздействием является зачистка и некоторая защита от коррозионно-механических и усталостных дефектов и повреждений, которые имеют место на поверхностях металлических изделий. При этом известно, что появление, развитие и распространение трещин существенно ограничивается вплоть до полного их исчезновения в зоне действия сжимающих напряжений, чему благоприятствует тот факт, что каждая отдельная частица дроби обладает наклепывающим действием, когда при ударе на поверхности детали возникают незначительные углубления, перекрывающиеся при деформации металла поверхностного слоя [4].

Под такой поверхностью материал обрабатываемой детали стремится вернуть свое исходное состояние, в результате чего под наклепанной дробью полусферой обработанного металла образуется сжатый слой. Возникающие в результате дробеструйной обработки частично или полностью перекрывающиеся углубления формируют на поверхности материала равномерную структуру, существенно увеличивающую прочность и надежность отдельных деталей, а, следовательно, и всего собранного из них узлов, механизмов и машин в целом. При этом механические и эксплуатационные свойства обрабатываемых изделий достигают более высоких показателей.

Основным приоритетом использования стальной дробы является то, что ее эксплуатационная стойкость, например, при разгоне в дробеметной турбине, вращающейся с частотой около 6900 об/мин, оказывается в 2,5...3 раза выше, по сравнению с чугунной дробью. Разрушающееся за один час работы дробеметного аппарата количество стальной дробы снижается с 23,0 до 9,5 кг при сокращении продолжительности очистки от 9 до 6 мин по сравнению с чугунной дробью [5].

С учетом практических наработок работы различных производств установлено, что применение в качестве абразива стальной дробы по сравнению с чугунной сокращает общую трудоемкость до 40 %. Кроме этого стальная дробь обеспечивает равномерное изнашивание лопастей дробеметных турбин, что позволяет повысить срок их службы от 10 до 15 раз. При этом расход стальной дробы в результате ее изнашивания и раскалывающего разрушения составляет 0,5...1 кг/час на одну дробеметную машину, тогда как для чугунной дробы эта величина достигает 5...7 кг/час [6].

К основополагающим показателям, характеризующим качество стальной дробы относятся ее износостойкость (определяемая прочностными испытаниями) и интенсивность обработки, т.е. величина воздействия дробы на обрабатываемую поверхность. С точки зрения экономичности наиболее лучшими абразивными свойствами обладает дробь, позволяющая максимально дольше по времени обрабатывать поверхность материала с наибольшей эффективностью до полного ее разрушения.

Для определения количественных показателей износостойкости дробы в лабораторных условиях заводов стальной дробы широкое распространение получило выявление ее долговечности в Эрвин-тестере (см. рисунок 1.2) [7], представляющего собой устройство, имитирующее процесс обработки дробью в реальном производстве, который оснащен счетчиком циклов ударного воздействия дробы на обрабатываемый материал [8].



а)



б)

а — машина Straube лаборатории Алчевского завода стальной дроби;

б — Эрвин-машина (США)

Рисунок 1.2 — Аппаратура определения износостойкости дроби

Анализ исследований различных видов стальной литой дроби показал, что ее износостойкость колеблется в пределах от 2500 до 5000 циклов, при этом полученные результаты в существенной мере зависят от величины фракции исследуемой дроби, определяемой методом ситового анализа [9].

В качестве выявления интенсивности воздействия выступает эффект обработки дробию участка поверхности на основании Алмен-теститования. Для этого стандартная измерительная пластина Альмена из листовой стали помещается в специальное зажимное устройство, где обрабатывается дробию с фиксацией количества циклов воздействия. После этого происходит ее извлечение с последующим замером изгиба на плоской поверхности специального стола, например, с помощью микрометра или специального приспособления. Выявленная величина изгиба, вызванная внутренними напряжениями под действием наклепа и характеризует интенсивность обработки [9].

Показатели износостойкости и интенсивности воздействия дроби главным образом характеризуются величиной твердости стальной дроби, которая в свою очередь зависит от химического состава стали, когда одним из существенных

факторов выступает содержание С-углерода и термической обработки при изготовлении дроби. На сегодняшний день широкое применение нашла дробь с высоким содержанием углерода (НС), низкоуглеродистая дробь (LC) и наименее распространенная дробь со средним содержанием углерода (МС).

Дальнейшее развитие и совершенствование абразивных свойств дроби вызвано применением колотой стальной дроби, получаемой путем разрушения (раскалывания) сферической дроби, как правило, с использованием барабанных мельниц. В качестве исполнительных органов в данных мельницах применяются шары, изготовленные из износостойкой стали (например, стали Гадфильда 110Г13Л) или специальных чугунов.

Повышенная эффективность воздействия стальной колотой дроби обусловлена ее остроугольными краями и практическим достаточно длительным применением в различных отраслях промышленности. В настоящее время существуют следующие основные категории такой дроби, каждая из которых обладает различной прочностью и эффективностью в обработке поверхностей, что предопределяет выбор нужной предприятию в каждом конкретном случае обработки необходимых параметров колотой дроби [10].

GP — колотая дробь (твердость 480...550HV / 47,7...52,4HRC). Обеспечивает более остроугольную и четче выраженную шероховатость обрабатываемой поверхности ( $R_z$  на 15% выше, чем у литой дроби,  $R_c$  больше на 15...20%) и применяется в процессах обработки, кроме упрочнения поверхности изделия (наклепа). Сферы применения: трубная промышленность (подготовка поверхности трубы перед нанесением изоляции), производство стальных конструкций (балки, сварные конструкции перед нанесением защитного покрытия), судостроение, литейное производство и др.

GL — колотая дробь (твердость 570...650 HV / 53,6...57,8 HRC).  $R_z$  и  $R_c$  значительно выше (на 2...5%), чем у дроби GP. Используется в тех же процессах, что и дробь GP, но обеспечивает более высокую эффективность при очистке пластовой окалины, а также изделий повышенной твердости (поковки из высокоуглеродистых и легированных сталей и чугуна специальных марок). При этом об-

разуется поверхность с шероховатостью, способствующей повышению адгезионных свойств, например, для ее покрытия различными износостойкими материалами.

GH — колотая дробь (твердость  $>840\text{HV} / 65,2\text{ HRC}$ ). При обработке поверхностей обеспечивает максимальные Rz и Rc (в среднем на 20...25% больше чем у GP и GL). В результате обладания высокой твердостью и хрупкостью устойчиво сохраняет остроугольную форму, обеспечивая максимальную производительность процесса обработки изделий, но характеризуется самым низким жизненным циклом относительно иных марок дроби. Преимущественно применяется для подготовки поверхности под последующее покрытие, а также при необходимости насечки валков.

GR — применяется исключительно для резки гранита и других высокопрочных каменно-рудных материалов.

Технологические характеристики стальной дроби зависят от физико-механических свойств, ее размеров и формы и характеризуются производительностью и эффективностью процесса обработки и способностью обеспечения ее требуемого качества.

Эксплуатационные характеристики дроби зависят от состава ее материала, микроструктуры, формы, размеров и оказывают влияние на производительность процесса обработки и ее качество, определяют долговечность, зависящую от сопротивления дроби раскалыванию и абразивному изнашиванию и влияют на изнашивание дробеструйных аппаратов.

Таким образом, на сегодняшний день наиболее эффективным абразивным материалом для дробеметной и дробеструйной обработки поверхностей является стальная колотая улучшенная дробь, выпускаемая в соответствии стандарту [11] (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1 — Спецификация остроугольной (колотой) дроби по ДСТУ 3184-95 (ГОСТ 11964-81) рассевом по SAE J444 [11]

Размер дроби, мм	Твердость HV (HRC)	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Массовая доля элементов, %				
			C	Si	Mn	S	P
0,1...0,2	350...550 (36...53) 550...850 (53...65)	min 7200	0,8...1,2	min 0,4	0,35...1,2	max 0,05	max 0,05
0,3							
0,5							
0,8							
1,0							
1,2							
1,4							
1,8							
2,2							

Данная разновидность дроби является наиболее перспективным и востребованным расходным компонентом в дробеструйной обработке и обеспечивает рациональный баланс, максимальную эффективность обработки с минимальными затратами на все составляющие себестоимости процесса. На сегодняшний день колотая дробь нашла широкую потребность в промышленно развитых странах. Перспективным направлением дальнейшего повышения технологических свойств колотой дроби является ее улучшение за счет наиболее тщательной, двойной термообработки и отбору по фракциям в более узком диапазоне.

## 1.2 Способы получения, характеристики гранулометрического и химического состава стальной дроби

Производительность и качество дробеструйной обработки различных материалов зависит от размеров и формы ее частиц, химического состава, организации внутренней структуры и твердости, что непосредственным образом сказывается

на глубине и шероховатости обрабатываемого слоя, а также на образовании наклепа [0].

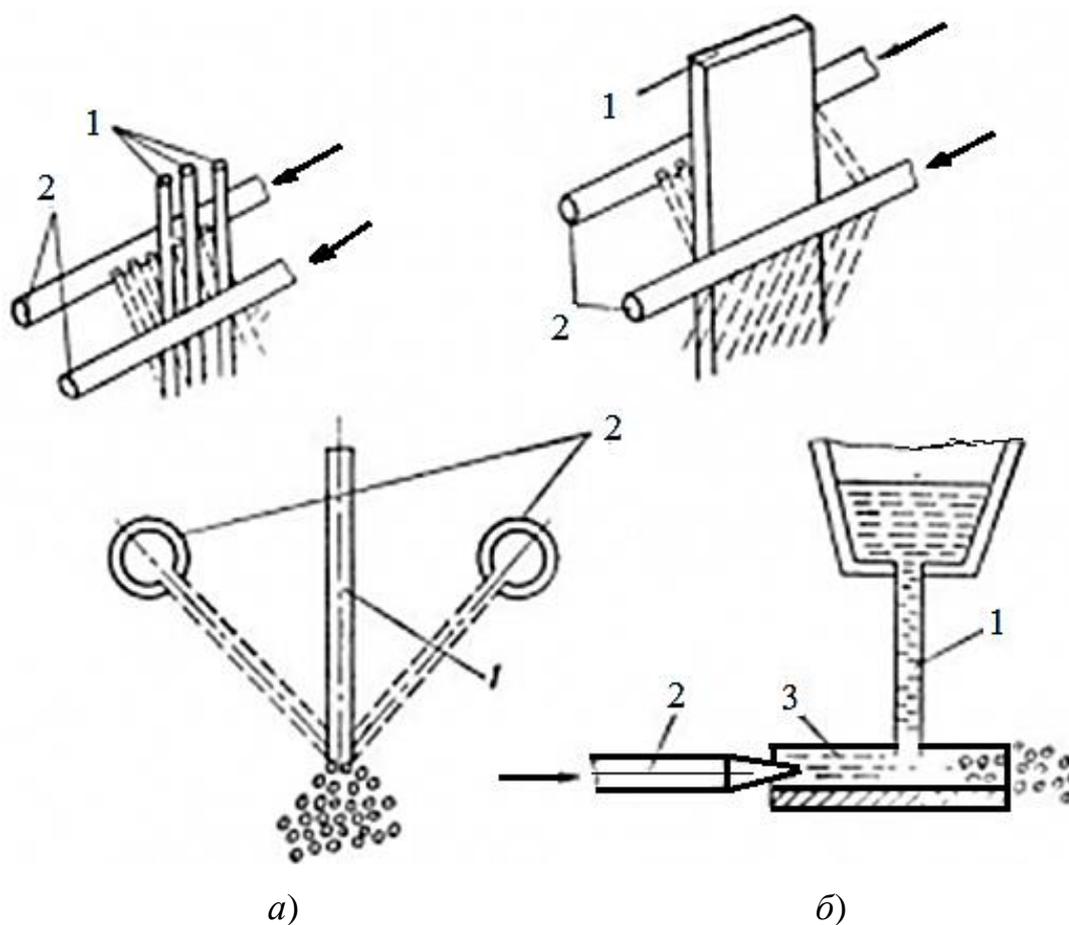
Наиболее используемой в дробеметной очистке стального литья и деталей является стальная дробь размерами от 1 до 3 мм. Фракция размерами менее 1 мм (стальной песок) является востребованной в магнитно-абразивном шлифовании деталей, бурении. Резку горных пород, осуществляют с помощью дроби диаметром от 3,5 мм и более, которая по своим режущим свойствам уступает разве что алмазному инструменту [0].

Для приготовления стальной дроби в основном применяется диспергирование струи расплавленного металла механическим путем или с использованием центробежных сил, а также потоками энергоносителя или распыление с помощью форсунок [12].

Дробление струи механическим путем, например, может происходить при контакте расплавленного металла с поверхностью барабана, диска, лопасти крыльчатки и т.д. После этого происходит образование формы частиц в результате сил поверхностного натяжения с последующим частичным охлаждением при полете и далее жидкостном охлаждении в бассейне.

Наиболее широкое применение нашло центробежное диспергирование посредством вращающейся чаши или перфорированного стакана. При этом получаемая дробь имеет более однородный гранулометрический состав, а выход мелкой и крупной некондиционной дроби уменьшен. Однако на практике данный способ главным образом пока используется лишь при изготовлении гранул из цветных металлов и сплавов.

Наиболее распространенным способом получения металлической дроби является метод дробления расплавленного металла энергоносителем с горизонтальным или вертикальным расположением форсуночных устройств (см. рисунок 1.3), т.к. данный метод обладает пониженными энергозатратами и высокой производительностью.



*a* — с вертикальными форсунками; *б* — с горизонтальными форсунками;  
 1 — струя жидкого металла; 2 — трубопровод энергоносителя; 3 — желоб

Рисунок 1.3 — Получение дроби распылением металла

Вертикальное расположение форсуночных устройств чаще используется при распылении вытекающей струи для образования дроби и металлических порошков с температурой застывания больше  $700^{\circ}\text{C}$  (см. рисунок 1.3, *a*), а горизонтальное расположение форсунок применяется для получения дроби из высокоуглеродистой стали путем распыления воды (см. рисунок 1.3, *б*). При этом расплавленный металл пробивает струю воды и дробится на мелкие капли, завертываемые и отсеваемые в охладителе.

В качестве энергоносителя применяется воздух, вода, инертные газы, пар, паровоздушная смесь и др.

Классификация дроби по крупности осуществляется вибрационным воздействием (см. рисунок 1.4) на специальных наборах стандартных сит (ротасиве).



Рисунок 1.4 — Грохота технологического отсева дробы (ротасив)

Зависимость выхода отдельных классов и их крупности описывается уравнением Розина-Раммлера [13]:

$$\frac{100}{R_c} = e^{m \cdot d^n}, \quad (1.9)$$

где  $R_c$  — остаток на сите с отверстиями определенного размера, %;

$e$  — основание натурального логарифма;

$m$  и  $n$  — коэффициенты, характеризующие свойства материала.

Для распределение Гилварри характерно то, что оно представлено [14, 15] в виде комбинированного экспоненциального и степенного законов, и при мелкой крупности частиц преобразуется в степенную зависимость. Однако однозначного решения оно так и не имеет, т.к. степенные показатели сильно разнятся и зависят от многих факторов, которые в полной мере учесть не возможно [16].

Так как дробь имеет неправильную форму, условно принимают в качестве ее размера диаметр сферической частицы, например, средневзвешенный диаметр:

$$D = \frac{\sum \gamma \cdot d}{\sum \gamma} = \frac{\gamma_1 \cdot d_1 + \gamma_2 \cdot d_2 + \dots + \gamma_n \cdot d_n}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n}, \quad (1.10)$$

где  $\gamma_i$  — процентный выход отдельных классов, %;

$d_i$  — средние диаметры частиц в соответствующих им классах, мм.

Гранулометрический состав стальной дроби отображен в таблицах 1.2–1.4.

Таблица 1.2 — Основные параметры литой и литой улучшенной дроби

Номер дроби	Рабочий размер отверстия сита, мм	Рабочий номинальный размер отверстия сита для отсева, мм	Допустимое содержание остатка на сите, %	
			Не менее*	Не более
1,8	1,800	1,600	90	—
		1,800	80	—
		2,800	—	1
2,2	2,200	1,800	95	—
		2,200	80	—
		3,200	—	1
2,8	2,800	2,200	95	—
		2,800	80	—
		3,600	—	1
3,2	3,200	2,800	90	—
		3,200	75	—
		4,500	—	1
3,6	3,600	3,200	94	—
		3,600	85	—

\* Для меньшего сита указана сумма остатков дроби на обоих ситах.

Таблица 1.3 — Рассев стальной сферической (литой) стальной дроби по SAE J444

(мм)	S1320	S1110	S930	S780	S660	S550	S460	S390	S330	S280	S230	S170	S110	S70
4,75	0													
4	–	0												
3,35	90	–	0											
2,8	97	90	–	0										
2,36		97	85	–	0									
2			97	85	–	0	0							
1,7				97	85	–	5	0						
1,4					97	85	–	5	0					
1,18						97	85	–	5	0				
1							96	85	–	5	0			
0,85								96	85	–	10	0		
0,71									96	85	–	10	0	
0,6										96	97	–	0	
0,5												–	10	
0,425												85	–	0
0,355												97	–	10
0,3													80	–
0,18													90	80
0,125														90

Таблица 1.4 — Рассев стальной остроугольной (колотой) стальной дроби по SAE J444

(мм)	G10	G12	G14	G16	G18	G25	G40	G50	G80	G120
2,8	0									
2,36	–	0								
2	80	–	0							

Продолжение таблицы 1.4

(мм)	G10	G12	G14	G16	G18	G25	G40	G50	G80	G120
1,7	90	80	–	0						
1,4		90	80	–	0					
1,18			90	85	–	0				
1				90	75	–	0			
0,85					–	–	–			
0,71					85	70	–	0		
0,6						–	–	–		
0,5						–	–	–		
0,425						85	70	–	0	
0,36							–	–	–	
0,3							80	65	–	0
0,18								75	65	–
0,125									75	60
0,075										70

Стальная дробь округлой формы, обладающая высокими эксплуатационными свойствами и имеющая высокие значения твердости и прочности может быть произведена только при четком соблюдении требований технологического процесса ее изготовления, начиная от самой разливки стали и до ее термической обработки.

ООО «Алчевский Завод стальной дроби» производит различные виды стальной дроби из заэвтектоидной легированной стали 80ГСЛ, твердостью 473 HV (по Виккерсу) со следующим содержанием химических элементов: углерод (С) — 0,8%; кремний (Si) — 1%; марганец (Mn) — 1,00%, никель (Ni) — не более 0,50, хром (Cr) — не более 0,50, фосфор — не более 0,050 и сера (S) — не более 0,050 [17].

Содержание углерода в высокоуглеродистой дроби составляет от 0,8% до 1,2%, а содержание углерода в низкоуглеродистой дроби от 0,1% до 0,2 %. Кремний и марганец не оказывают существенного влияния на показатели твердости стали.

Для повышения абразивной способности предварительно полученную на специализированных заводах стальную дробь подвергают закаливанию, что существенно повышает ее твердость [12, 18]. Однако, ввиду эффекта усадки, проявляются микроскопические трещины, которые невозможно полностью удалить при последующей термической обработке, что способствует более эффективному раскалыванию стальной дроби.

Повышение эксплуатационных свойств стальной литой дроби [18] достигается низким содержанием углерода, что снижает твердость при закалке. Согласно рекомендациям итальянской фирмы Rometon содержание углерода в низкоуглеродистой дроби должно составлять 0,05...0,20%, кремния — 0,05...0,15%, марганца — 0,10...0,45% [20].

К недостаткам получения низкоуглеродистой стальной дроби необходимо отнести малую текучесть металла в расплавленном состоянии из-за чего она в основном не образует сферических частиц, а выход годной дроби, составляет около 50%.

Индукционная термическая обработка стали позволяет существенно сократить длительность цикла и исключить угар металла и обезуглероживание, однако пока она не нашла массового внедрения в производстве стальной дроби в связи с трудностью качественного нагрева мелких частиц и нестабильности полученных результатов [0, 12].

Количество частиц дроби, содержащихся в одном килограмме, приведено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 — Примерное содержание частиц в 1 кг дроби

Марка дроби											
WS 930	WS 780	WS 660	WS 550	WS 460	WS 390	WS 330	WS 280	WS 230	WS 170	WS 110	WS 070
Диаметр дроби, мм											
2,36	2,00	1,70	1,40	1,18	1,00	0,85	0,71	0,60	0,50	0,30	0,18
Количество частиц в одном килограмме, тыс. шт.											
19,99	29,98	45,88	78,33	126,46	203,0	326,68	553,86	906,69	1547,65	7076,58	32352,4

Дробь остроугольной формы производится путем раскалывания фракций стальной сферической дроби, которые преимущественно остались после реализации необходимых объемов заказов. Так на Алчевском заводе стальной дроби для этих целей используются две шаровые мельницы с двигателями мощностью 55 кВт и производительностью около 1,2 т/ч. При суммарной производительности предприятия порядка 30 тыс. тонн в год, количество колотой дроби составляет около 1/3 или в среднем 10 тыс. тонн в год, при этом максимальный выпуск остроугольной дроби не превышает 12...13 тыс. тонн в год. Мелющими телами служат стальные шары с исходным диаметром 102 мм, обладающие поверхностной твердостью по Виккерсу 800 HV (примерно 84 HRA или 65 HRC), которые подлежат замене при износе до 80 мм. Загрузка шаровой мельницы составляет около 5,5 т, что примерно соответствует 800 шарам приблизительной массой около 6,2 кг каждый.

Крупность фракций и их процентное соотношение при раскалывании дроби диаметром 2,2 мм показаны в таблице 1.6.

Таблица 1.6 — Крупность при колке дробы диаметром 2,2 мм

Фракционный состав колотой стальной дробы при исходном диаметре частиц 2,2 мм, %			
0–0,5	0,5–0,8	0,8–1,0	1,0–1,7
30 %	25 %	25 %	20 %

Получение товарных фракций стальной дробы производится рассевом на грохотах (ротосивах) в соответствии с ДСТУ 3184-95 [21] (ГОСТ 11964-81 [11]) (см. таблицу 1.6), а также с фракционным составом по международному стандарту SAE J444 [22].

### **1.3 Анализ способов дробления материалов и машин для приготовления колотой дробы**

Вопросам изучения процессов диспергирования материалов уделяется серьезное внимание, начиная с зарождения и последующего развития промышленной революции. Считается, что на дробление и измельчение различных компонентов, к которым в первую очередь относятся полезные ископаемые, извлекаемые из земной коры затрачивается до 20 % всей энергии, получаемой на земном шаре [13–25]. При этом всего лишь от 2 до 20 % этой энергии непосредственно расходуется именно на процессы дробления и измельчения, а остальная часть — на выделение тепла, преодоление сил трения, создание вибрационных и шумовых волн и т.д. [9].

В качестве конкретного способа разрушения понимается вид преобладающего воздействия нагрузки, накладываемой на материал. Для реализации преимущественного способа разрушения конструируются и изготавливаются специальные машины, устройство которых гарантирует определенный вид наложения таких усилий [26].

Процессы дробления и измельчения используются для обеспечения требуемого значения крупности различных сырьевых компонентов в рамках заданного

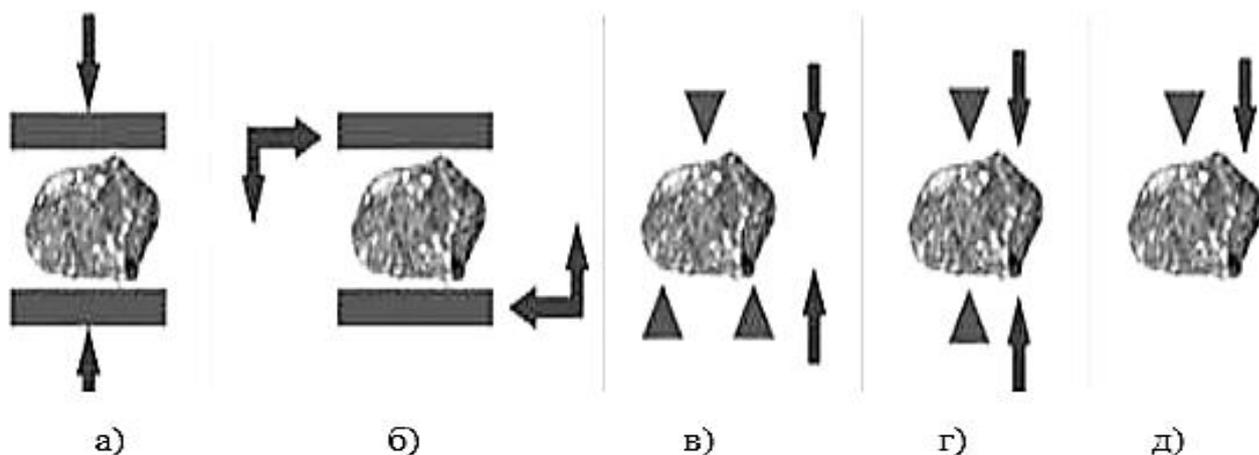
гранулометрического состава. Применительно к колотой стальной дробь ее частицы могут разрушаться под действием внешних сил преимущественно по ослабленным сечениям, имеющим трещины или другие дефекты структуры, при превышении предела прочности материала на сжатие, растяжение, изгиб или сдвиг.

Диспергирование осуществляется при разрушении цельных компонентов материала при критических внутренних напряжениях, создаваемых в результате какого-либо нагружения и превышающих соответствующий предел прочности. Различные способы дробления и измельчения отличаются видом основной необратимой деформации, однако условно измельчением принято считать процесс, при котором крупность готового продукта достигает размеров менее 5 мм, при его размерах более 5 мм процесс называется дроблением [13–24].

Разрушающие нагрузки на материал могут реализовываться различными путями, а именно: механическим нагружением, температурными воздействиями, ультразвуковыми колебаниями и др.

Существует четкая зависимость между размером частицы и расходом энергии на ее разрушение, при этом чем выше необходимая степень измельчения, тем больше затрат энергии на ее достижение [13–24].

В настоящее время в зависимости от назначения и принципа действия машин, производящих диспергирование материала, наибольшее распространение нашли такие способы механического разрушения: раздавливание (см. рисунок 1.5, *а*), истирание (см. рисунок 1.5, *б*), изгиб (см. рисунок 1.5, *в*), раскалывание (см. рисунок 1.5, *г*), ударное воздействие («свободный удар») (см. рисунок 1.5, *д*) [26].



*а* — раздавливание; *б* — истирание; *в* — изгиб; *г* — раскалывание;  
*д* — свободный удар

Рисунок 1.5 — Схема основных способов механического разрушения

Как правило, указанные виды силового воздействия осуществляются комбинированно и одновременно, например, раздавливание и истирание, удар и истирание и др. Отсюда и значительное разнообразие различных конструктивных решений дробильно-измельчительных устройств применительно к разновидностям физико-механических свойств, исходных и конечных размеров дробимых материалов.

На основе широкого практического опыта выдвинуты рекомендации по использованию соответствующих видов нагрузок в зависимости от физико-механических свойств дробимого материала и требований к готовой продукции. Например, для разрушения хрупких и прочных материалов наиболее рациональным является раздавливание с изломом, для прочных и вязких материалов преимущественным является раздавливание с истиранием [13–25]. Для осуществления крупного дробления мягких и хрупких компонентов наиболее целесообразным является раскалывание, а среднее и мелкое дробление хорошо реализуется при ударном разрушении [13–25].

Обычно процессы дробления и измельчения осуществляются сухим способом, а мокрое дробление с добавлением влаги проводят с целью сокращения образования пыли [13–24]. Например, в химической промышленности перетирание

различных материалов (например, пигмента красителя с олифой) выполняют в жидкой среде с помощью твердых шарикообразных мелющих тел малого диаметра (бисера) [25, 26].

Наиболее широкую реализацию в технике получили механические способы диспергирования различного сырья или готовой продукции с применением методов интенсификации процессов [27] на основе структуризации [28], современных методов научных исследований, и синтеза [29] принципиально-новых способов и устройств [30, 31].

К основным требованиям, предъявляемым к дробильно-измельчительной технике относятся: простота конструкции, удобство и безопасность обслуживания; минимально необходимое количество деталей, подверженных активному износу и быстрота их замены; наличие предохранительных устройств, обеспечивающих преодоление предельных нагрузок на рабочие органы (распорные плиты, срезные болты и др.) [26].

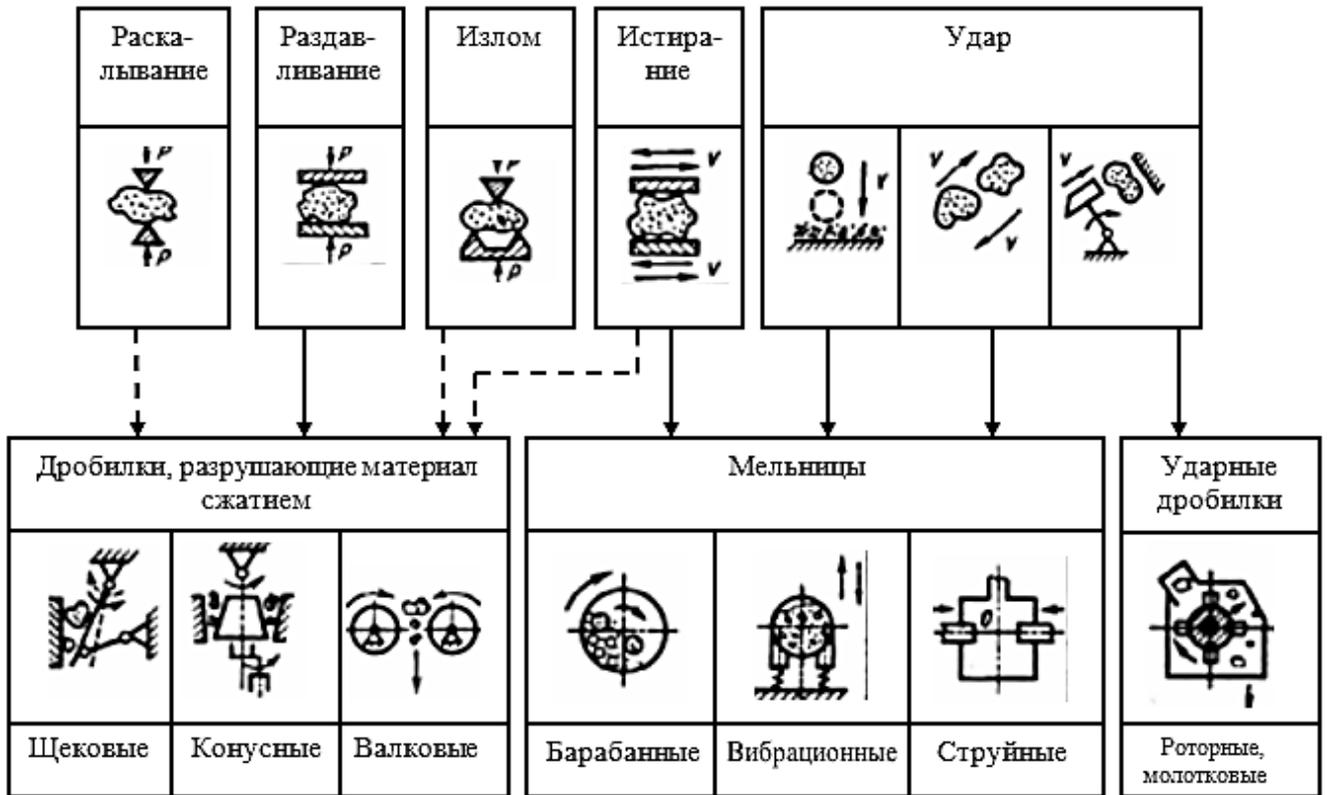
Эффективность дробильно-измельчительных процессов оценивается степенью измельчения:

$$i = \frac{D}{d}, \quad (1.1)$$

где  $D$  — средний размер (диаметр) отдельных кусков исходного продукта, мм;

$d$  — средний размер (диаметр) кусков готового продукта, мм.

Способы разрушения материалов, реализуемые в дробилках и мельницах, приведены на рисунке 1.6 [26].



————— — преобладающие; - - - - - — сопутствующие

Рисунок 1.6 — Способы механического разрушения материалов, реализуемые в дробилках и мельницах

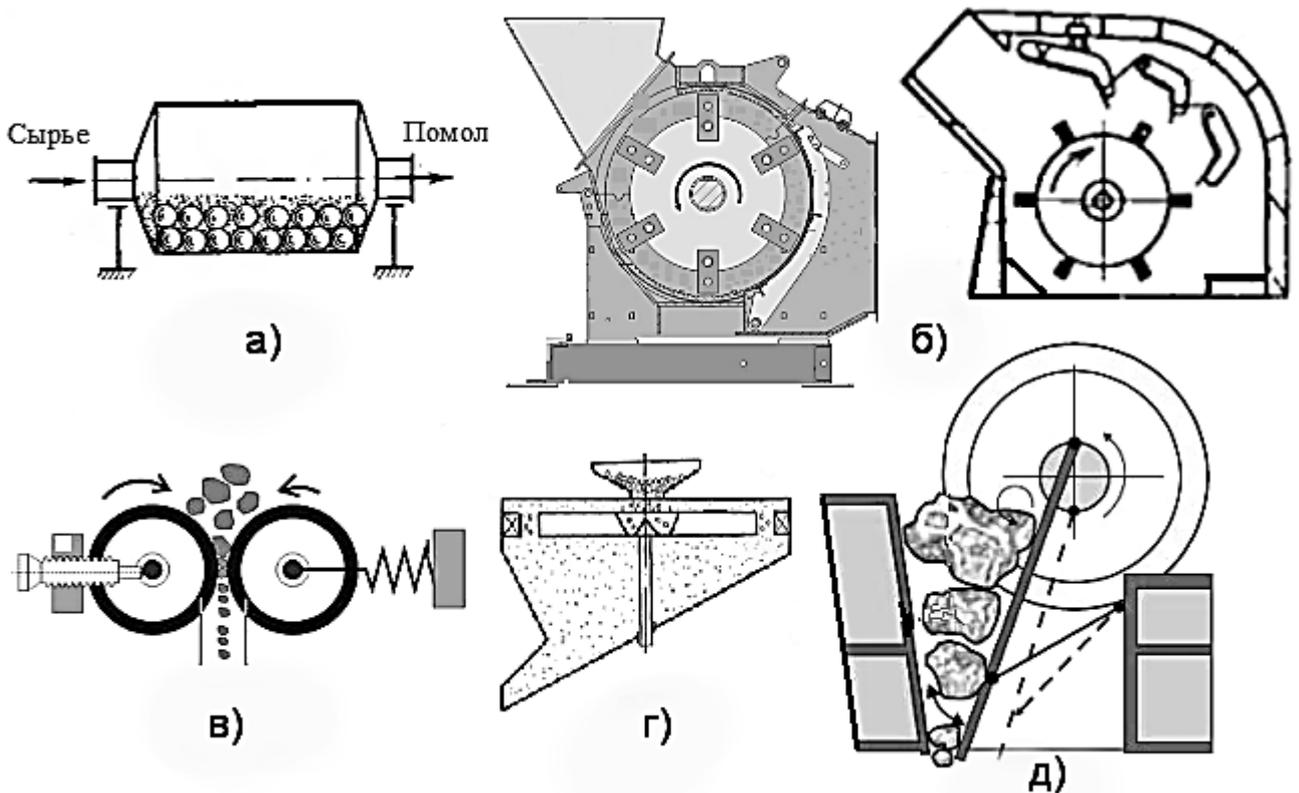
Из известных и относительно легко реализуемых технологий ударный способ раскалывания стальной дробы является одним из наиболее перспективных как по производительности, так и по удельным энергозатратам.

Ударные нагрузки могут возникать при падении измельчающих тел на материал (стесненный удар), его столкновения с неподвижной поверхностью (свободный удар), столкновении материала и измельчающих тел в полете (удар на лету), столкновении в полете самих измельчающих частиц друг с другом (самоизмельчение) [23].

При воздействии механического удара кинетическая энергия движущихся тел может частично или в полной мере преобразовываться в энергию разрушения и деформации, поэтому устройства, реализующие ударный способ воздействия обладают следующими преимуществами:

- более высокой степенью дробления, позволяющей сократить многостадийность обработки;
- высокой удельной производительностью (на единицу массы машины);
- простотой конструкции;
- удобством обслуживания;
- селективностью (избирательностью) дробления;
- относительно высоким качеством готового продукта.

К измельчительным машинам ударного и раскалывающего действия, которые могут быть применимы для приготовления колотой стальной дроби можно отнести барабанные, молотковые, роторные, центробежные, валковые и щековые дробилки, схематические изображения которых показаны на рисунке 1.7 [25].



*а* — барабанные; *б* — молотковые и роторные; *в* — валковые;  
*г* — разгонно-ударные; *д* — щековые

Рисунок 1.7 — Схемы дробилок ударного и раздавливающего действия

В производстве стальной колотой дроби широкое распространение нашли барабанные мельницы (см. рисунок 1.7, *а*) с мелющей загрузкой в виде шаров, изготовленных из стали 110Г13Л (Гадфильда) или износостойкого чугуна, броневая футеровка которых также выполнена из стали Гадфильда [12–34].

Невзирая на простоту организации разрушающих усилий, основным их недостатком является малая эффективность работы, обусловленная низким коэффициентом полезного действия и повышенными энергозатратами. Это объясняется тем, что ввиду ударного контакта мелющих шаров вероятность прямого центрального удара с частицами стальной дроби остается очень низкой, т.к. из-за вращения мелющих тел при падении и преимущественного их касательного воздействия на дробь особенно в начальный период разрушения преобладают касательные удары, что приводит к многочисленным рикошетам и непроизводительному расходованию энергии на перемешивание пульпы.

При этом, в последующий период, когда в результате предварительной обработки дробь теряет сферическую форму, интенсивность ударов резко возрастает и зачастую приводит к переизмельчению, приводя готовый продукт к пылевидным фракциями, идущим на выбраковку с последующей переплавкой, следовательно, и лишними затратами энергии на образование колотой дробы. Нами предложена идея повышения вероятности реализации прямого удара в шаровых мельницах за счет применения в качестве мелющей загрузки тел многоугольной формы с плоскими поверхностями, однако она еще требует дальнейшего тщательного изучения и проработки. Таким образом в настоящее время назрела насущная необходимость в замене шаровых мельниц на более перспективные в отношении раскалывания стальной дробы машины.

Молотковые и роторные дробилки (см. рисунок 1.7, *б*), реализующие принцип свободного удара за счет соударения вращающихся ударников (бил) с материалом при наложении кинетического ударного воздействия [35], в приготовлении колотой дробы не применяются, что очевидно связано с необходимостью придания рабочим органам чрезмерно высокой скорости вращения ввиду нерациональности ударного импульса при ударе на лету, когда энергия в значительной

мере будет расходоваться на передачу движения самой дроби и в меньшей степени на ее разрушение. Причем в данном случае очень остро встает вопрос тщательной балансировки ротора и организации безопасности обслуживающего персонала, т.к. из-за высоких абразивных свойств дробы возможно непредсказуемое разрушение рабочих органов и защитного кожуха машины с вероятностью вылета в окружающее пространство.

Перспективным решением может являться применение разгонно-ударных мельниц (см. рисунок 1.7, *з*) [36], по сути реализующих обратный принцип, чем в молотковых дробилках, и повторяющий в увеличенном масштабе процессы, происходящие в лабораторной машине Straube (см. рисунок 1.2, *а*) для циклической стойкости, когда дробь выбрасывается из центробежного лопастного ротора под прямым углом (центральный удар) на неподвижную футеровку и разбивается от соударения с ней [37, 38]. В данных машинах также возможна многоступенчатая обработка материала [39].

Однако идея совмещения нескольких стадий в едином устройстве за счет коаксиального размещения нескольких роторов не нашла пока применения в технике [40], и не всегда может решить доведение крупности материала до желаемой кондиции, т.к. известно, что при измельчении частиц до определенного размера скорость их удара уже не оказывает существенного влияния в связи с малым ударным импульсом, зависящим от массы частиц [41].

По сути этому способу присущи те же недостатки [42], что и для молотковых [43, 44, 45] и роторных мельниц, хотя литературные источники, посвященные изучению таких машин указывают, что угловая частота вращения ротора при тех же условиях может быть несколько понижена, что, впрочем, не особо решает вопрос безопасности персонала и балансировки вращающихся частей [43, 46]. При этом выявлено, что при подключении электродвигателя к валу ротора через повышающую передачу (мультипликатор) необходимо применение специальных мер для плавного разгона из-за большого момента инерции системы, что может привести к перегреву обмоток двигателя и выхода их из строя, если не придерживаться этих мер [47].

На Алчевском заводе стальной дроби в настоящее время предпринята попытка организовать процесс раскалывания сферической дроби с помощью валковой мельницы (см. рисунок 1.7, в), когда раздавливание частиц происходит между вращающимися навстречу друг другу с частотой около 60 об/мин цилиндрическими валками диаметром 400 мм и длиной 250 мм при мощности электродвигателя 10 кВт. При этом производительность процесса достигает 200 кг/ч.

К недостаткам такого метода относятся: возможность вылета дроби из-за малого угла захвата [48]; вклинивание твердых частиц в поверхность валков; прогиб осей вращения валков из-за больших распорных усилий и низкая производительность. Кроме того ввиду низкой, по сути статической, скорости наложения раскалывающей нагрузки с элементами сдвига оказывается, что плоскость раскалывания дроби образуется преимущественно по середине, что не совсем удовлетворяет требованиям качества к остроугольным абразивным частицам.

Анализ возможности использования щековых дробилок (см. рисунок 1.7, д) для раскалывания сферической стальной дроби показывает, что в них реализуется самый энергоемкий по затратам электрической энергии способ раздавливания с достаточно медленными скоростями. При этом основные рабочие органы машины должны иметь очень твердую футеровку и совершать качания с повышенной частотой, что труднодостижимо с точки зрения повышенной инерционности системы и будет сказываться на ее надежности, вызывая частые остановки для осуществления ремонтов.

Простые же эксперименты по раскалыванию дроби способом «молот по наковальне», помещенной на плоскую твердую поверхность (например, рельс) показывают, что для любого диаметра частицы достаточно высоты подъема кувалды весом около 5 кг на высоту не более 200 мм. При этом скорость соударения является относительно малой, что будет положительно сказываться на безопасности обслуживающего персонала, а при достаточно жесткой конструкции основания (наковальни) никаких особо опасных напряжений, приводящих к ее поломкам происходить не будет. Вероятно, это связано с тем, что здесь осуществляется стесненный прямой удар, почти полностью исключая рикошетирующие, т.к.

дробь раскалывается между плоскими поверхностями, когда энергия разрушения реализуется по двум векторам, направленным навстречу друг другу, что, по сути, приводит к ярко выраженной концентрации разрушающих сил.

Таким образом, проведенный аналитический анализ способов и машин для возможного приготовления стальной колотой дробы показывает, что применяемый в настоящее время на заводах стальной дробы способ производства колотой (остроугольной) дробы в шаровых мельницах является морально устаревшим ввиду своей низкой эффективности и требует замены на более современный. Применение других типовых конструкций известных дробильно-измельчительных машин на основе анализа работы молотковых, роторных, разгонно-ударных, валковых и щековых дробилок в полной мере не позволяет провести их модернизацию для приготовления колотой дробы. В связи с этим на первый план выдвигается задача создания принципиально-нового устройства для раскалывания дробы сферической формы, реализующего способ разрушения «молот по наковальне» [49], как простой и эффективный метод реализации прямого стесненного удара, что требует проведения предварительных экспериментальных исследований по данному направлению, создания кинематической схемы машины, выполнения теоретических расчетов для обоснования ее основных параметров, а также разработки и создания экспериментальной физической модели и ее испытаний.

## **1.4 Теоретические аспекты процессов дробления и измельчения материалов**

### **1.4.1 Основные законы дробления и измельчения**

В качестве одного из основных параметров работы машин, предназначенных для разрушения материалов выступают затраты энергии на единицу производимого продукта. Поэтому данному вопросу особое внимание уделялось и уделяется различными исследователями на протяжении длительного времени.

Первоначально Р. Риттингером была предложена гипотеза о том, что «работа, затраченная при измельчении, пропорциональна вновь образованной поверхности» [50–52]:

$$A = k_P \cdot \Delta F = k_P \cdot (i - 1) \cdot D_K, \quad (1.3)$$

где  $k_P$  — коэффициент пропорциональности Риттингера;

$\Delta F$  — приращение вновь образовавшейся поверхности, м,

$i$  — степень измельчения материала;

$D_K$  — средний размер исходных кусков материала, м.

Дальнейшее изучение затрат энергии в этом направлении получило развитие в теоретических исследованиях В.Л. Кирпичева с последующей экспериментальной проверкой на практике Ф. Киком. Закон Кирпичева-Кика гласит, что «энергия, необходимая для одинакового измельчения формы геометрически подобных тел, пропорциональна объемам или массам этих же тел» и является актуальным для разрушения кусков больших размеров с незначительной степенью измельчения [50–52]:

$$A = k_K \cdot D_K^3, \quad (1.4)$$

где  $k_K$  — коэффициент пропорциональности Кирпичева-Кика.

Бондом было установлена пропорциональность работы разрушения образца материала его среднему геометрическому размеру, и ее зависимости от объема и площади поверхности:

$$A = k_B \cdot \sqrt{\Delta V_K \cdot \Delta F} = k_B \cdot D_K^{2.5}, \quad (1.5)$$

П.А. Ребиндер по сути обобщил ранее полученные зависимости, показав, что в период упругих и пластичных деформаций, предшествующий разрушению тела, происходит накопление объемной энергии до критической величины, обеспечивающей его разрушение [50–52]:

$$A = k_R \cdot \Delta V + \sigma' \cdot \Delta F, \quad (1.6)$$

где  $k_R$  и  $\sigma'$  — соответственно, коэффициенты пропорциональности;

$\Delta V_\kappa$  — изменение величины объема куска после разрушения, м.

К сожалению, пока еще на сегодняшний день в рассмотренных законах дробления и измельчения основные трудности заключаются в определении адекватных численных значений коэффициентов пропорциональностей, что серьезно затрудняет их использование в практической деятельности.

### 1.4.2 Особенности разрушения материалов ударом

Согласно работам Гриффита разрушение частицы реализуется при развитии одной или нескольких трещин, причем если они расположены близко друг от друга, то могут объединяться в одну общую трещину [53, 54].

Так как при возрастании скорости наложения усилий предел прочности материала и удельная работа разрушения увеличиваются, что учитывается величиной критической скорости внутреннего смещения частиц материала гарантирующей его разрушение [55]. Поэтому для одинаковой величины кинетической энергии главную роль играет повышение массы движущихся или падающих мелющих элементов по сравнению с наращиванием их скорости [56]. При этом особое влияние оказывает абсолютная величина работы удара, при этом является не важным, каким путем это достигнуто (повышением массы или скорости). Учет такой особенности может описываться наименьшей величиной работы удара, требуемой для полного разрушения частицы, называемой динамической твердостью [56, 57].

Изучением особенностей ударного изнашивания, проявляющегося как следствие взаимного контакта частиц расположенных друг против друга, занимался В. Н. Виноградов и Г. М. Сорокин [58]. Направление этих работ пошло преимущественно по пути изучения износа поверхностей при наличии абразива. В дальнейшем Утцем и Веллингером исследовалось ударное изнашивание металлических поверхностей при пластическом деформировании [59].

Классификация, предложенная Г. М. Сорокиным [60] путем изучения анализа макро- и микрорельефа поверхностей и особенностей их изнашивания, учитывает ударно-абразивное, ударно-гидроабразивное, ударно-усталостное и ударно-тепловое виды изнашиваний.

Ударно-абразивное разрушение реализуется в случае силового контакта соприкасающихся поверхностей, когда между ними имеются частицы, обладающие большей твердостью, чем сами поверхности [58, 60].

Работа Ю. В. Колесникова [62] учитывала ударно-усталостное разрушение в результате многократного ударного контакта поверхностей, когда в начальный период более твердые частицы по сравнению с исходными поверхностями отсутствовали [63].

Так как любой вид [60] изнашивания характеризуется накоплением усталостных повреждений, а, следовательно, является ударно-усталостным, то понятия ударного и ударно-усталостного изнашиваний можно отождествлять, а другие виды с особыми условиями контактирования (ударно-абразивное и т. д.) разделять.

Наибольший вклад в механику разрушения внести Ш. Кулон, У. Д. Ренкин, О. Мор, А. Гриффит, Я. Д. Фридман, Е. О. Орован, А. Надаи, Дж. Ирвин, Д. Друкер, В. В. Новожилов, С. Н. Журков, Л. И. Седов, Г. П. Черепанов, Ю. В. Зайцев, Д. А. Коллинз [61].

Ударное изнашивание зависит от физико-механических свойств контактирующих между собой тел, температуры и условий среды, относительной скорости ударного воздействия и его энергии, количества циклов соударений. Большую роль также оказывают коэффициент восстановления, сила и длительность удара,

величины контактной деформации и температуры. При многократных соударениях в поверхностной зоне происходит изменение напряженно-деформированного состояния, упрочнение, а также структурные и фазовые превращения, кроме того меняется топография и морфология поверхности.

Начальная кинетическая энергия удара определяется массой ударника или частицы и квадратом начальной скорости. При этом около 10 % этой энергии затрачивается на упругое восстановление (отскок), а 90 % преобразуется в энергию деформации, составляющей около 30 % и остаточную энергию неупругого соударения в пределах до 60 %, еще около 2...3 % энергии способствует образованию упругих волн [63].

Скорость деформации существенным образом влияет на механические свойства материалов, в частности на предел текучести [64], когда при всех прочих равных условиях при статическом нагружении контактная деформация проявляется в более полной мере, чем при динамическом.

При единичном ударе на протяжении порядка доли миллисекунды на поверхности контакта и вблизи его может развиваться температура от 200–300 до 500°C, а в мегаскопических объемах даже подниматься до 1000 °C, что подтверждается по присутствию фазовых превращений в металле, при повторном же ударе температура не поднимается выше 40 % от той, что при первичном ударе [64].

Разрушение на макроскопическом уровне обусловлено напряженно-деформированным состоянием металла при ударном взаимодействии контактирующих тел, когда микротрещина образуется и в последующем развивается скачкообразно вплоть до магистральной макротрещины [62]. В подвергнутых упрочнению металлах образуются кольцеобразные и радиальные трещины, пересекающиеся между собой [62], которые при многократном ударном нагружении, ввиду их развития, приводят к дроблению материала.

Сопротивление материала ударному разрушению характеризуется ударной вязкостью [65]:

$$a = \frac{A}{S}, \quad (1.7)$$

где  $A$  — работа, затраченная на деформацию и разрушение образца, Дж;  
 $S$  — площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ .

Стойкость на удар определяется суммированием энергий деформации  $A_{\text{деф}}$  и разрушения  $A_{\text{разр}}$ :

$$A = A_{\text{деф}} + A_{\text{разр}} \quad (1.8)$$

Первоначально частица подвергается деформации, а потом проходящая через нее трещина приводит к образованию новых поверхностей, при этом большим сопротивлением ударному разрушению подвержены вязкие материалы, поглощающие энергию за счет их деформации [65] (см. рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 — Диаграммы ударного разрушения материалов

Работы А. Ф. Иоффе показали, что реальная величина прочности составляет от 0,001 до 0,1 от теоретически рассчитанного ее значения, что вызывается наличием дефектов внутренней структуры частиц [66].

Исследования А. А. Гриффита выявили, что перспектива роста трещины хрупкого материала зависит от ее длины, и при этом требуется прикладывать дополнительную работу на образование новых поверхностей [54].

Д. Ирвин и Е. Орован предложили для оценки напряженного состояния концевой зоны и возможности распространения трещины учитывать коэффициент интенсивности напряжений (КИН) вместо предела прочности, используемого в сопротивлении материалов [67], что позволило учитывать дефекты внутренней структуры материала [68].

Выполненный анализ возможных способов получения колотой дробы и применяемых для этого дробильно-измельчительной техники в сравнительной совокупности с существующими способами разрушения материалов позволяет на уровне гипотезы сделать предположение, что эффективное раскалывание литой стальной дробы для образования остроугольных частиц возможно достичь путем создания в рабочей камере машины ударного контакта под прямым углом падающих мелющих тел с находящимися на массивном основании частицами дробы округлой формы на базе создания роторно-ударного измельчителя.

С учетом низкой вероятности создания прямого удара в широко применяемый для приготовления колотой дробы шаровых мельницах научная идея работы состоит в организации технологического процесса раскалывания сферической дробы путем обеспечения преимущественного лобового стесненного удара, что должно гарантировать более полный переход кинетической энергии падающих тел в энергию разрушения [69].

## Выводы к разделу 1

1. Рассмотрены особенности применения стальной дробы в промышленности, ее разновидности. Установлено, что остроугольная стальная колотая дробь имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами абразивной обработки поверхностей металлических изделий, таких как: постоянство физико-химических свойств (твердость, фракционный состав и прочее); повышенное число циклов работы (до 10); значительное снижение концентрации пыли в рабочей зоне; безвредность для оператора дробеструйной установки; широкая область применения.

2. Проведен анализ способов получения, характеристики гранулометрического и химического состава сферической литой и остроугольной стальной колотой дробы. Рассмотрены характеристики и принцип действия оборудования, применяемого для измельчения и фракционной подготовки стальной дробы в настоящий момент.

3. Рассмотрены основные механические способы разрушения твердых тел и проведен анализ достоинств и недостатков различных типов дробильно-измельчительных машин при использовании их в условиях раскалывания стальной сферической дробы. Установлено, что применение молотковых, роторных, разгонно-ударных, валковых и щековых дробилок не соответствуют в полной мере технико-технологическим требованиям процесса изготовления стальной колотой дробы, а используемые в данное время шаровые мельницы обладают относительно невысокой эффективностью (коэффициент полезного действия не превышает 20 %), а их использование в условиях производства остроугольной дробы приводит к переизмельчению готового продукта.

4. Установлено, что недостатком основных законов дробления и измельчения является отсутствие универсальности их применения в различных условиях, которые требуют введения соответствующих специальных коэффициентов пропорциональности, при этом определение значения работы, необходимой для разрушения при раскалывании сферической дробы, обеспечивается достаточно про-

стым путем, в основе которого лежит учет потенциальной и кинетической энергии мелющего тела, приводящей к разрушению частицы при его падении с определенной высоты.

5. Рассмотрены особенности реализации ударного разрушения твердого упругого тела. Установлено, что наиболее рациональным условием создания разрушающих усилий является реализация прямого стесненного удара, в связи с чем на первый план выдвигается задача создания принципиально нового устройства для раскалывания дроби сферической формы, реализующего способ разрушения «молот по наковальне».

**РАЗДЕЛ 2****МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ И ПАРАМЕТРОВ  
РОТОРНО-УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ**

Разрабатываемая конструкция роторно-ударного измельчителя на основе принципиально нового технического решения по патенту Российской Федерации № 2729155 [70] не имеет широко распространенных аналогов в сфере дробления и измельчения различных материалов, и, следовательно, требует более направленного подхода для разработки, создания и всестороннего изучения технологических процессов, происходящих в рабочей камере такого устройства.

Для проверки адекватности результатов, полученных аналитическим путем, и обоснования основных конструктивно-технологических параметров роторно-ударного измельчителя, реализующего прямой стесненный удар, в качестве программы и направлений исследований предложено:

1. Провести лабораторные исследования и определить энергию разрушения стальной дроби сферической формы путем воздействия прямого стесненного удара в лабораторных условиях.

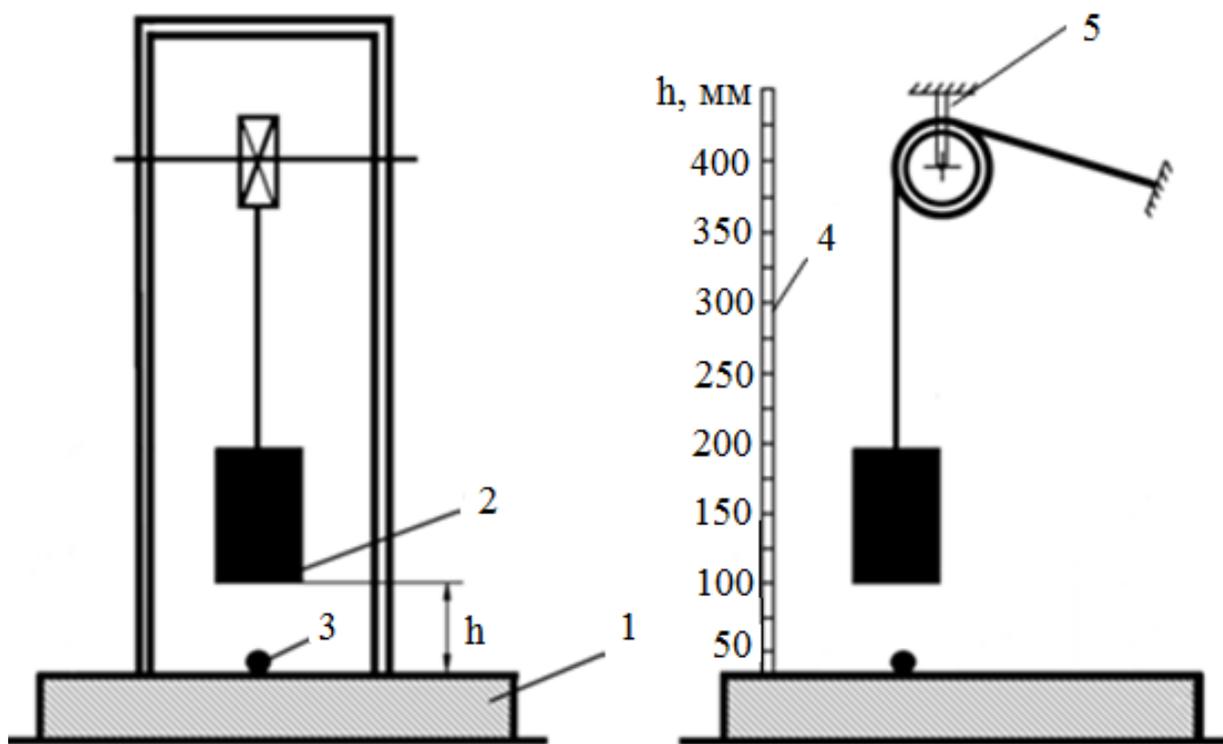
2. Используя теорию подобия определить основные параметры физической модели роторно-ударного измельчителя.

3. На основе метода планирования многофакторного эксперимента проверить адекватность математической модели и обосновать основные конструктивно-технологические параметры, влияющие на показатели работы роторно-ударного измельчителя, реализующего разрушение материала прямым стесненным ударом.

## 2.1 Описание методик экспериментальных исследований процесса измельчения стальной дроби стесненным ударом

### 2.1.1 Методика и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях процесса раскалывания одиночных частиц стальной дроби

Для проведения экспериментальных исследований по определению затрачиваемой энергии для раскалывания одиночных частиц дроби разработана и изготовлена экспериментальная установка — вертикальный копер с падающим грузом (см. рисунок 2.1 и 2.2) [71].



1 — станина; 2 — груз; 3 — образец стальной дроби;  
4 — измерительная линейка; 5 — блок

Рисунок 2.1 — Схема экспериментальной установки для ударного разрушения одиночных частиц дроби



Рисунок 2.2 — Внешний вид экспериментальной установки

Установка состоит из станины 1, на которую устанавливается образец дробы 3, подлежащий разрушению. Для этого груз 2 поднимается вверх посредством блока 5. Для определения высоты подъема груза служит измерительная линейка 4.

При падении груза на частицу дробы, когда внутренние напряжения достигают предела прочности на сжатие, дробь разрушается. При этом образуются частицы различного размера и формы.

Испытания основаны на принципе измерения энергии, затраченной на разрушение образца, сопротивляемость которого ударному воздействию характеризует хрупкость или способность сопротивляться динамическим напряжениям. Сущность метода заключается в определении минимальной высоты падения груза, при которой образец разрушается под действием прямого стесненного удара.

Отобранная по размеру дробь устанавливается в центр падения груза, где подвергается воздействию падающего рабочего органа (груза), массу которого можно увеличивать или уменьшать в зависимости от размера раскалываемой частицы дроби. При этом определяющими являются напряжения сжатия, под действием которых материал дроби подвергается деформации по всему объему.

Метод предназначен для одиночных и массовых испытаний по разрушению частиц стальной дроби в лабораторных условиях.

В качестве показателя сопротивления стальной дроби ударному воздействию принимается минимальная высота сбрасывания груза, при которой происходит разрушение дроби.

Первый удар производится с минимальной высоты, заранее определяемой для каждого диаметра испытуемого образца дроби, при которой образец еще не разрушается. Каждый последующий удар наносят с постепенным увеличением высоты поднятия груза на 10 мм. Испытания проводятся до тех пор, пока образец дроби не разрушится. При необходимости увеличивается масса груза. Если после удара образец дроби не разрушается, а только лишь сминается, то такая дробь заменяется на новую во избежание погрешности эксперимента.

Сопротивление образцов дроби ударному воздействию вычисляется как среднее арифметическое значение результатов испытаний не менее трех образцов.

Энергия удара рассчитывалась по формуле [72]:

$$E = m_{gp} \cdot g \cdot h_{cp}, \quad (2.1)$$

где  $m_{gp}$  — масса груза, кг;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h_{cp}$  — среднее арифметическое значение высоты сбрасывания груза, м.

Объем сферической дробинки [72]:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3, \quad (2.2)$$

где  $d$  — диаметр дробинки, мм.

Тогда удельные энергозатраты определяются как:

$$e_v = \frac{E}{V}. \quad (2.3)$$

В качестве образцов использовалась стальная сферическая дробь, производимая в условиях ООО «Завод стальной дроби» [11, 17, 21] со следующими параметрами: объемная плотность — 7820 кг/м<sup>3</sup>; модуль упругости — 2,0×10<sup>11</sup> Па; модуль сдвига — 7,8×10<sup>9</sup> Па; предел прочности на растяжение (сжатие) — 1020,0 МПа, твердость 450...470 НВ, диаметром 1,8...2,9 мм.

### **2.1.2 Методика и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях процесса раскалывания слоя стальной дроби**

С целью подтверждения достоверности выдвинутых теоретических предположений и изучения процесса раскалывания твердых сферических тел в массовом количестве проводились экспериментальные исследования процесса раскалывания стальной литой дроби при реализации стесненного ударного контакта со свободно падающим грузом, а также при наложении ударной нагрузки на лабораторном маятниковом копре КМ–30 [73] (см. рисунок 2.3).

Параметры маятникового копра при проведении экспериментальных исследований: масса, сосредоточенная в центре ударного контакта 22,53 кг; расстояние от оси качания маятника до центра соударения 0,965 м; наибольший запас энергии молота 294,3 Дж. В качестве материала использовалась дробь сферическая

стальная литая 80ГСЛ разного диаметра с твердостью 450–470 HV и пределом статического временного сопротивления на растяжение  $\sigma_{ст.сж} = 1020$  МПа (коэффициент пропорциональности динамического предела прочности на сжатие задавался  $k_{\sigma} = 3,1$ ). Радиус кривизны ударной рабочей поверхности молотка копра принимался 3 м. Модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала дроби и ударного рабочего органа принимались равными 205 ГПа и 0,33 соответственно.

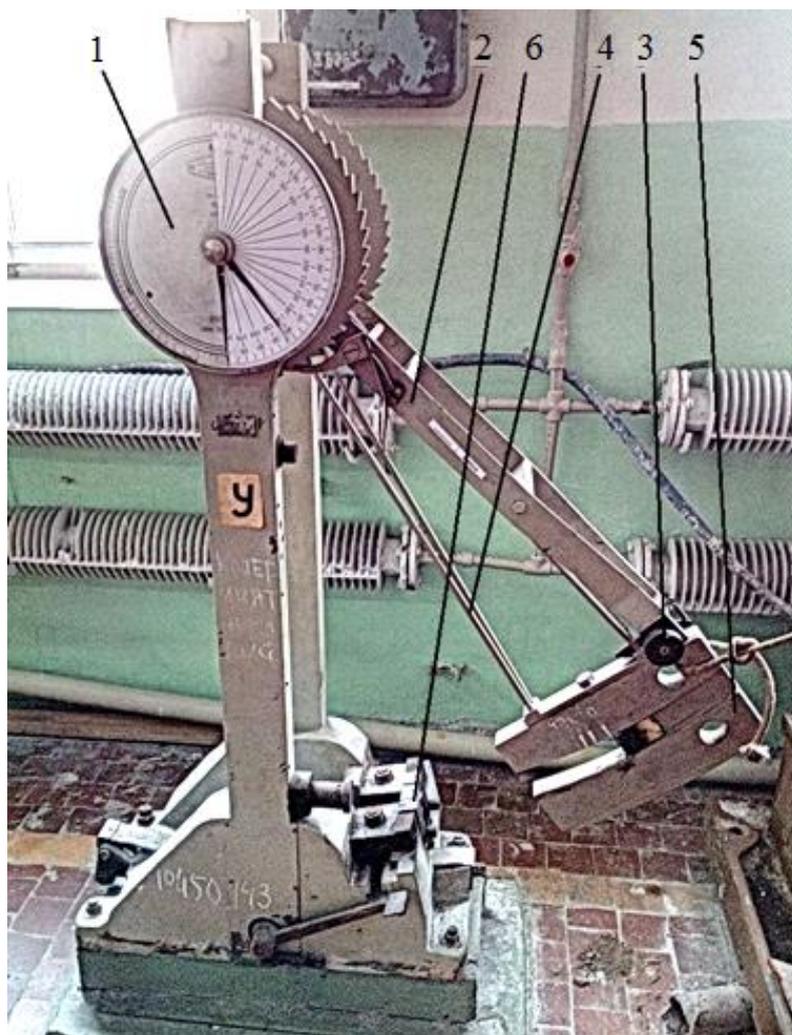


Рисунок 2.3 — Внешний вид лабораторного маятникового копра

Сущность методики эмпирических исследований процесса раскалывания материалов стесненным ударом заключается в определении минимальной скорости (энергии) ударного контакта при определенном угле отклонения маятника 4 по шкале 1, при котором задаваемое количество частиц испытуемой стальной

дробь различной фракции, расположенной в один слой, разрушается под воздействием прямого стесненного удара молотом.

Определенное количество отобранной по размеру дробь устанавливается на высокопрочной металлической пластине б из твердосплавного материала (см. рисунок 2.4), расположенной в нижней части рамы маятникового копра 2.



*a)*

*б)*

*a* — до ударного контакта с молотом; *б* — после ударного контакта с молотом

Рисунок 2.4 — Внешний вид пластины с дробью

При проведении экспериментальных исследований процесса разрушения слоя дробь маятник 4 поднимался до необходимого положения, затем освобождалась защелка фиксатора 3 и маятник 4 свободно падал под собственным весом, осуществляя стесненный удар молотом 5 по образцам, расположенных в нижней части рамы копра 2, разрушая их. При этом фиксировалась величина угла отклонения маятника, при котором происходило разрушение образца и определялась скорость ударного контакта. Первый удар производился с наименьшей заданной высоты, заранее определяемой для каждого диаметра испытуемого образца дробь, при которой образец еще не разрушается. Каждый последующий удар наносился с постепенным увеличением высоты поднятия за счет отклонения маятника на  $1^\circ$  вверх. Испытания проводились до тех пор, пока не обеспечивалось разрушение всех образцов дробь при одиночном ударе молота.

Если после ударного нагружения образцы дроби не раскалываются, а только лишь деформируются, или не все дробинки раскалывались, то такая дробь заменяется на новую и эксперимент повторяется при большем значении угла отклонения маятника, и соответственно — скорости ударного контакта.

Затраченная энергия определяется по запасу энергии маятника до удара:

$$A = m_m \cdot g \cdot H_m = P_m \cdot l_m \cdot \cos \alpha_m, \quad (2.4)$$

где  $m_m$  — масса маятника, кг;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H_m$  — высота центра тяжести маятника относительно точки встречи бойка с образцом до удара, м;

$l_m$  — расстояние от оси качания маятника до центра тяжести молота, м;

$\alpha_m$  — угол подъема маятника, рад.

Энергия удара заранее подсчитана по угловому отклонению маятника, а шкала ее измерения размещена на отсчетном устройстве (см. рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 — Отсчетное устройство маятникового копра со шкалой, учитывающей угол отклонения маятника и энергию удара

Подтверждение адекватности разработанных аналитического и конечно-элементного методов исследования процесса разрушения стальной сферической дроби и достоверности результатов экспериментальных исследований процесса разрушения исследуемых материалов деформацией одноосного сжатия осуществлялась на основании способа определения относительной погрешности измерений и параметрического метода статистической проверки гипотез (статистических критериев), основанных на распределении  $t$ -критерия Стьюдента [74, 75].

## **2.2 Методика и оборудование, применяемые при экспериментальных исследованиях процесса измельчения дроби в роторно-ударном измельчителе**

В качестве лабораторного оборудования для экспериментального определения энергосиловых параметров процесса измельчения стальной дроби сферической формы согласно основным положениям теории подобия [76–78] разработана и изготовлена физическая модель роторно-ударного измельчителя, основанная на принципе, описанном в патенте на изобретение [70].

В соответствии с этой теорией определяются признаки наличия подобия между процессами (явлениями) и задаются границы области, при которых распространение данных моделирования на аналогичные реальные процессы или явления могут считаться корректным [79].

### **2.2.1 Определение критериев подобия физической модели и природы роторно-ударного измельчителя**

В соответствии с теорией подобия, полное подобие двух исследуемых процессов будет обеспечено при соблюдении геометрического, кинематического и динамического условий подобия.

Две физические системы геометрически подобны, если соотношения между их соответствующими геометрическими (линейными) размерами являются константой [79, 81]:

$$\frac{D_H}{D_M} = \frac{B_H}{B_M} = \frac{L_H}{L_M} = \frac{d_{вн}}{d_{вм}} = m_L = const, \quad (2.5)$$

где  $D_H$  и  $D_M$  — диаметр рабочей камеры натуры и модели соответственно, м;  
 $B_H$  и  $B_M$  — ширина рабочей камеры натуры и модели соответственно, м;  
 $L_H$  и  $L_M$  — длина рабочего участка натуры и модели соответственно, м;  
 $d_{вн}$  и  $d_{вм}$  — диаметр вала (ротора) натуры и модели соответственно.

Для геометрически подобных систем соотношения площадей и объемов также постоянны [79, 81]:

$$\frac{S_H}{S_M} = m_L^2 = const; \quad \frac{V_H}{V_M} = m_L^3 = const, \quad (2.6)$$

где  $S_H$  и  $S_M$  — площадь рабочей камеры натуры и модели соответственно, м<sup>2</sup>.  
 $V_H$  и  $V_M$  — объем рабочей камеры натуры и модели соответственно, м<sup>3</sup>.

Согласно кинематическому подобию поля скоростей натуры и модели подобны, когда соотношения скоростей и ускорений в сходных точках натуры и модели являются одинаковыми [79, 81]:

$$\frac{v_H}{v_M} = m_v = const; \quad \frac{a_H}{a_M} = m_a = const, \quad (2.7)$$

где  $v_H$  и  $v_M$  — скорость линейного движения ударника натуры и модели соответственно в момент контакта с разрушаемым материалом, м/с;

$a_H$  и  $a_M$  — ускорение линейного движения ударника натуры и модели соответственно, м/с<sup>2</sup>.

Для динамического подобия необходимо, чтобы соотношения одноименных сил в сходных точках натуры и модели были постоянны [79, 81]:

$$\frac{F_H}{F_M} = m_F = const, \quad (2.8)$$

где  $F_H$  и  $F_M$  — сила воздействия ударника натуры и модели на разрушаемый материал соответственно, Н;

Для соотношения скоростей модели и натуры необходимо, чтобы масштабный коэффициент скорости [76]:

$$m_v = \frac{v_H}{v_M} = m_L^{0,5}, \quad (2.9)$$

где  $v_H$  и  $v_M$  — скорости ударного контакта ударника с разрушаемым материалом для натуры и модели соответственно, м/с;

$m_L$  — линейный масштаб, показывающий во сколько раз размеры модели  $D_M, B_M, L_M, d_{вм}$  меньше размеров натуры  $D_H, B_H, L_H, d_{вн}$ .

Тогда с учетом принятого значения линейного масштаба  $m_L = 10$ , получаем:

$$m_v = \frac{v_H}{v_M} = 3,16.$$

Сила воздействия мелющего тела (ударника) на раскалываемую дробь, находится по формуле [80]:

$$F_y = m_y \cdot g, \text{ Н} \quad (2.10)$$

где  $m_y$  — масса мелющего тела (ударника), кг;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

С учетом значений параметров, входящих в формулу (3.7) при однорядном исполнении роторно-ударного измельчителя, получаем:

$$F_y = m_y \cdot g = 240 \cdot 9,81 = 2354 \text{ Н.}$$

Для соотношения сил природы и модели принято [76]:

$$\frac{F_H}{F_M} = m_\rho \cdot m_v^2 \cdot m_L^2, \quad (2.11)$$

$m_\rho$  — масштабный коэффициент плотности материала ударника;

$$m_\rho = \frac{\rho_H}{\rho_M}, \quad (2.12)$$

где  $\rho_H$  и  $\rho_M$  — плотность материала ударника для природы и модели соответственно,  $\rho_H = \rho_M = 7800 \text{ кг/м}^3$

Окончательно получаем:

$$m_F = \frac{F_H}{F_M} = 1 \cdot 3,16^2 \cdot 10^2 = 1000.$$

Отсюда:

$$F_M = \frac{F_H}{m_F} = \frac{2354}{1000} = 2,35 \text{ Н.}$$

Скорость ударного контакта мелющего тела (ударника) [80]:

$$v_y = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_n} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1} = 4,4 \text{ м/с} \quad (2.13)$$

где  $h_n$  — высота падения мелющего тела (1 м);

Скорость ударного контакта мелющего тела (ударника) для модели:

$$v_M = \frac{v_H}{m_v} = \frac{4,4}{3,16} = 1,39 \text{ м/с.} \quad (2.14)$$

Обобщенный критерий динамического подобия механических систем (критерий Ньютона):

$$Ne = \frac{F_H}{\rho_H \cdot v_H^2 \cdot L_H^2} = \frac{F_M}{\rho_M \cdot v_M^2 \cdot L_M^2} \quad (2.15)$$

где  $L_H$  и  $L_M$  — характерный линейный размер ударника натуры и модели соответственно.

Отношения между геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами натуры (Н) и модели (М), определяемые на основе соответствующих критериев механического подобия, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Результаты расчета параметров модели

Параметры	Обозначение		Значения		Формула
	Натура	Модель	Натура	Модель	
Диаметр рабочей камеры, м	$D_H$	$D_M$	2,10	0,21	$\frac{D_H}{D_M} = 10$
Ширина рабочей камеры, м	$B_H$	$B_M$	1,62	0,16	$\frac{B_H}{B_M} = 10$
Длина рабочего участка, м	$L_H$	$L_M$	0,35	0,035	$\frac{L_H}{L_M} = 10$
Диаметр вала (ротора), м	$d_{вН}$	$d_{вМ}$	0,3	0,03	$\frac{d_{вН}}{d_{вМ}} = 10$
Плотность материала ударника, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_H$	$\rho_M$	7800	7800	$\frac{\rho_H}{\rho_M} = 1$
Линейная скорость ударника, м/с	$v_H$	$v_M$	4,4	1,39	$\frac{v_H}{v_M} = 3,16$
Сила воздействия ударника на разрушаемый материал, Н	$F_H$	$F_M$	2354	2,35	$\frac{F_H}{F_M} = 1000$

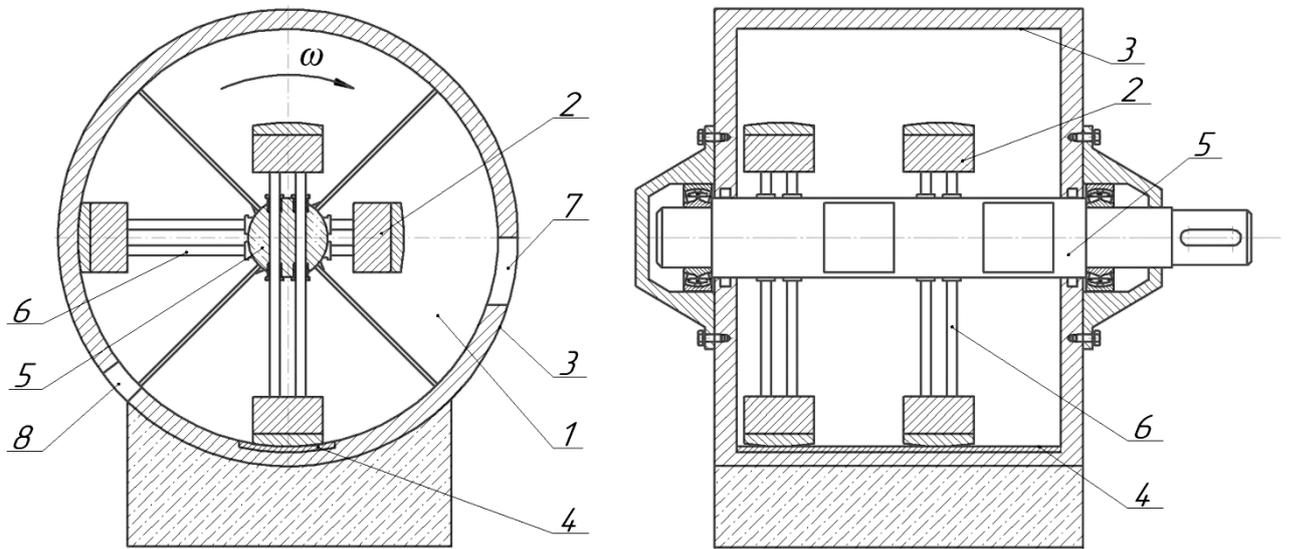
Вычислим значения критерия Ньютона для натуре и модели:

$$Ne_n = \frac{F_n}{\rho_n \cdot v_n^2 \cdot L_n^2} = \frac{2354}{7800 \cdot 4,4^2 \cdot 0,35^2} = 0,127 ;$$

$$Ne_m = \frac{F_m}{\rho_m \cdot v_m^2 \cdot L_m^2} = \frac{2,35}{7800 \cdot 1,39^2 \cdot 0,035^2} = 0,127 .$$

### 2.2.2 Физическая модель роторно-ударного измельчителя и описание технических характеристик дробы

Предложенный инновационный способ разрушения материалов стесненным ударом (см. рисунок 2.6), включает в себя взаимодействие падающих мелющих тел с измельчаемым материалом под действием вращающегося ротора, причем диаметрально расположенные друг относительно друга мелющие тела жестко связанные между собой и образуют единую кинематическую пару с ротором с двумя степенями свободы [70].



1 — рабочая камера; 2 — мелющие тела; 3 — цилиндрический корпус; 4 — броня;  
5 — ротор; 6 — штоки; 7 — загрузочное отверстие; 8 — разгрузочное отверстие

Рисунок 2.6 — Измельчитель для реализации способа стесненного удара

Материал, подлежащий измельчению, подается в рабочую камеру 1 через загрузочное отверстие 7, где попадает под действие падающих мелющих тел 2 и

разрушается между ними и внутренней стенкой корпуса 3, которая может иметь футеровку из износостойкой брони 4 из стали Гадфильда (110 Г13Л), обладающей хорошей износостойкостью при ударе в результате ее упрочнения из-за наклепа.

Так как мелющие тела 2 и рабочая поверхность внутренней стенки корпуса 3 имеют одинаковую геометрическую конфигурацию в местах контакта, то обеспечивается наиболее эффективный вариант разрушения материала прямым стесненным ударом, когда практически вся кинетическая энергия мелющих тел переходит в работу разрушения, чем достигается ударный контакт мелющих тел 2 с разрушаемым материалом под прямым углом или углом близким к прямому.

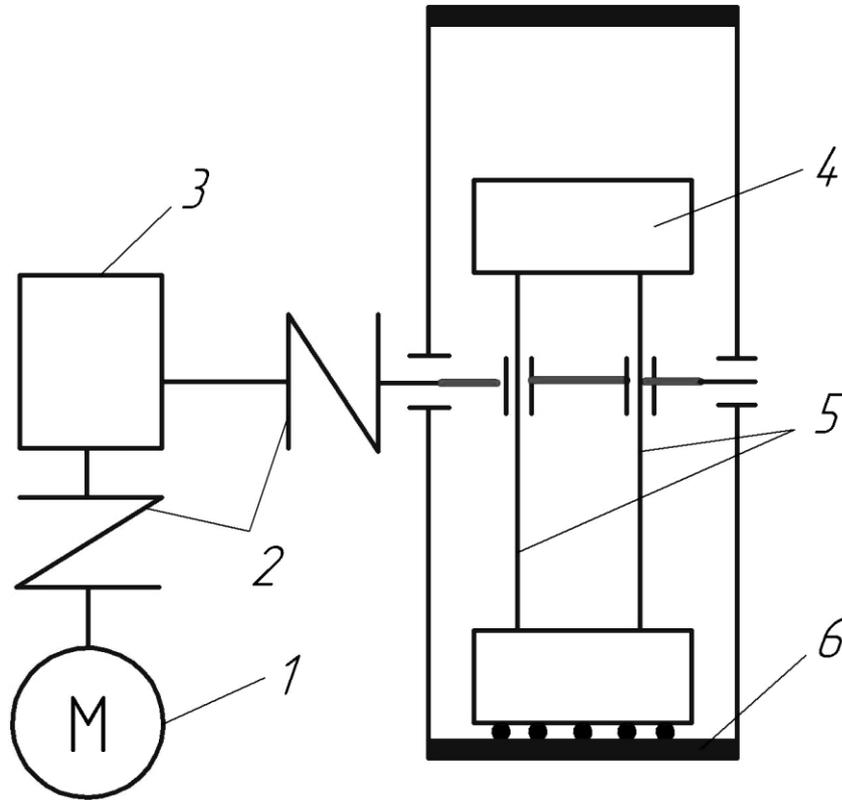
Падение мелющих тел 2 обеспечивается вращением ротора 5, через который в отверстиях проходят штоки 6. По мере вращения ротора 5, кинематически связанные с ним мелющие тела 2 поднимаются вверх, накапливая при этом потенциальную энергию, преобразованную из кинетической энергии вращения ротора 5 от привода. При жесткой связи мелющих тел 2 энергия разрушения увеличивается пропорционально их массе, поэтому лучшим вариантом является тот, когда они жестко связаны между собой и образуют посредством штоков 6 единую кинематическую пару с ротором 5. Выгрузка готового продукта осуществляется через разгрузочное отверстие 8.

Регулируя частоту вращения ротора 5 можно задавать различное число циклов разрушения материала, тем самым обеспечивая необходимую производительность готового продукта заданного качества.

На основании предложенного способа разрушения материалов стесненным ударом [70] разработан роторно-ударный измельчитель, кинематическая схема которого показана на рисунке 2.7.

Ввиду необходимости вращения ротора с малой угловой скоростью для обеспечения свободного падения мелющих тел под действием сил тяжести, целесообразным является применение в приводе червячного редуктора, обладающего повышенным передаточным числом и значительным крутящим моментом [70], так как масса поднимаемых мелющих тел может достигать больших величин (нескольких сотен килограмм). При этом измельчитель для увеличения производи-

тельности процесса приготовления колотой дробы может иметь многорядное исполнение. Равномерное смещение мелющих тел разных рядов на одинаковый угол способствует более плавному распределению нагрузки на вал электродвигателя.



1 — электродвигатель; 2 — муфты; 3 — червячный редуктор; 4 — мелющие тела;  
5 — штоки; 6 — футеровка корпуса из износостойкой брони

Рисунок 2.7 — Кинематическая схема физической модели измельчителя

При разработке конструкции и кинематической схемы измельчителя основополагающими факторами являлись простота изготовления и общая надежность работы машины в целом.

При изготовлении физической модели роторно-ударного измельчителя, представленной на рисунке 2.8, в качестве привода машины был использован типовой асинхронный электродвигатель 4А80В6У3 мощностью 1,1 кВт с номинальной частотой вращения 920 об/мин, соединенный с помощью эластичной муфты с быстроходным валом червячного одноступенчатого редуктора с передаточным числом  $i = 41$ .



Рисунок 2.8 — Физическая модель роторно-ударного измельчителя

В данной физической модели основными конструктивными параметрами, влияющими на результаты эксперимента, являются: масса ударника  $m_m = 1,2$  кг; масса штока  $m_{ш} = 0,08$  кг; радиус верхнего положения ударника  $r = 0,065$  м; радиус вала ротора  $r_r = 0,015$  м; радиус рабочей камеры  $R = 0,105$  м; коэффициент трения материала ударника по материалу корпуса  $f_2 = 0,15$ .

В качестве дробимого материала в ходе исследований использовалась стальная сферическая дробь, производимая из стали 80ГСЛ, со следующими характеристиками (см. таблицу 2.2).

Таблица 2.2 — Основные характеристики стальной дроби

Параметры	Значения
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7820
Диаметр, мм	1,8...2,9
Предел прочности на сжатие, МПа	1020

Для снятия основных показателей работы физической модели роторно-ударного измельчителя использовался лабораторный комплекс (см. рисунок 2.9), состоящий из самой модели дробильной машины, инвертора (преобразователя постоянного напряжения в переменное) серии А2 [82], цифрового многофункционального реле МР63 [83], снабженного индикацией показателей напряжения, силы потребляемого тока и мощности, а также ампервольтметра Н 339 [84]. Контроль частоты вращения ротора вала ударно-роторного измельчителя осуществлялся тахометром часового типа ИО-10, обладающего возможностями перенастройки шкал на разные скоростные характеристики [85].



Рисунок 2.9 — Лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований роторно-ударного измельчителя

### 2.2.3 Тиристорный электропривод трехфазного переменного тока в условиях проведения эксперимента

В связи с необходимостью бесступенчатого изменения частоты вращения ротора измельчителя, как одного из исследуемых факторов, для этих целей применялся тиристорный электропривод трехфазного тока ЭКТ2Д-63/380-50-АУХЛ4 (см. рисунок 2.10) [86] и служащий для управления двигателями переменного тока типов: ВАО, 4А, АО2 и других. Он позволяет регулировать частоту вращения трехфазных двигателей переменного тока изменением частоты тока электрической сети питания с характеристиками, приведенными в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Технические данные электропривода ЭКТ2Д-63/380-50-АУХЛ4

Название параметра	Значение
Номинальное напряжение питающей сети, В	380
Частота питающей сети, Гц	50, 60
Число фаз, шт	3
Диапазон регулирования напряжения (действующего значения) при напряжении питающей сети не менее номинального, В	0–380
Отклонение напряжения от номинального значения, %	± 2,5
Допустимая нагрузка от номинального тока, %	150
Продолжительность допустимой нагрузки, с	120
Номинальная мощность, кВт	41,5
Диапазон регулирования частоты, Гц	1–60
Рабочий диапазон регулирования частоты, Гц	5–60
Рабочий диапазон регулирования напряжения, В	38–380
Потребляемая мощность, кВт	45,2
Коэффициент мощности (не менее)	0,83
Коэффициент сдвига нагрузки	0,15–0,9
Коэффициент полезного действия (не менее), %	92

Продолжение таблица 2.3

Название параметра	Значение
Мгновенное значение тока нагрузки при номинальном входном напряжении (не более), А	180
Мгновенное значение тока нагрузки при входном напряжении ниже номинального (не более), А	145
Удельная масса (не более), кг/кВт	9,16



а)

б)



в)

Рисунок 2.10 — Электропривод ЭКТ2Д-63/380-50-АУХЛ4

Данный электропривод обеспечивает:

– регулирование выходного напряжения до номинального значения, но не выше напряжения питающей сети в функции частоты по закону:

$$\frac{U}{f_{\text{в}}} = \text{const} = 1,7 \div 7,6 \text{ при } f_{\text{ном}} = 200 \text{ Гц}; \quad (2.16)$$

$$\frac{U}{f_{\text{в}}} = \text{const} = 4,0 \div 7,6 \text{ при } f_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}, \quad (2.17)$$

где  $U$  — действующее значение выходного напряжения, В;

$f_{\text{в}}$  — выходная частота, Гц;

– работу с током  $1,5 \cdot I_{\text{ном}}$  в течение 120...180 с;

– пуск, торможение и реверс электродвигателя;

– работу с номинальным током на нагрузку, имеющую коэффициент сдвига 0,15–0,9 при  $f_{\text{ном}}=50$  Гц и 0,15–0,7 при  $f_{\text{ном}}=200$  Гц.

Электропривод оснащен следующими измерительными приборами:

– вольтметром выходного напряжения (для измерения напряжения на выходе из электропривода) с диапазоном измерений 0...420 В и точностью измерения  $\pm 2,5 \%$ ;

– вольтметром выходной частоты (для измерения частоты на выходе из электропривода косвенным методом) с диапазоном измерений 0...160 В и точностью измерения  $\pm 2 \%$ ;

– амперметром с диапазоном измерений 0...200 А и точностью измерения  $\pm 2,5 \%$ .

Электропривод позволяет осуществлять грубую и точную регулировку частоты вращения вала электродвигателя с возможностью реверсирования направления вращения. Он оснащен системами защиты от короткого замыкания, перегрузки и обрыва фаз.

#### 2.2.4 Описание способа определения мощности привода роторно-ударного измельчителя в установившемся режиме

Первоначально перед исследованиями самого процесса дробления материалов в физической модели роторно-ударного измельчителя определялась потребляемая мощность на его холостом ходу при 50,0 об/мин, которая составила 100,0 Вт (см. рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 — Значение мощности холостого хода роторно-ударного измельчителя

Тогда мощность установившегося режима при измельчении дробы в роторно-ударном измельчителе будет определяться как сумма мощности на холостом

ходу и мощности, затрачиваемой на преодоление момента сопротивления (формула 3.64):

$$W = W_{\text{сопр}} + W_{\text{х.х.}} \frac{\omega_i}{\omega_n}, \quad (2.18)$$

где  $W_{\text{сопр}}$  — мощность, затрачиваемая на преодоление момента сопротивления (определяется по формуле (3.92)), Вт;

$W_{\text{х.х.}}$  — мощность холостого хода роторно-ударного измельчителя, Вт;

$\omega_i$  — угловая скорость вращения вала двигателя при проведении эксперимента, рад/с;

$\omega_n$  — угловая скорость вращения вала двигателя при определении мощности холостого хода, рад/с.

Угловые скорости вращения вала двигателя определяются по зависимости:

$$\omega_i = \frac{\pi n_{\text{об}}}{30}, \quad (2.19)$$

где  $n_{\text{об}}$  — число оборотов вала двигателя в минуту, об/мин.

### **2.2.5 Методика проведения экспериментальных исследований процесса измельчения стальной дроби в роторно-ударном измельчителе**

Для проведения многофакторного эксперимента используется центральное композиционное ротатабельное униформпланирование второго порядка [88], так как этот тип планирования отличается высокой равномерностью распределения информации по сферам факторного пространства [89].

В ротатабельном плане получаемая информация о поверхности отклика является одинаковой для всех направлений (факторов) в точках, удаленных на равные расстояния от центра эксперимента [88]. Он инвариантен к ортогональному вращению координат и позволяет получить равномерно «размазанную» информацию по сферам. Это соответствует условию, когда дисперсия критерия оптимизации будет постоянной для всех точек, находящихся на одинаковом расстоянии от центра эксперимента. Априори вид поверхности отклика неизвестен, поэтому важно получить симметричные информационные контуры – кривые или поверхности равной информации. В этом случае информация равномерно «размазана» по сферам или, в  $n$ -мерном случае — по гиперсферам [88]. Для описания поверхности отклика полиномами второй степени, «ядро» плана достраивается звездными точками [88], которые расположены от центра эксперимента на расстоянии звездного плеча  $\alpha$ . Кроме того, для оценки кривизны поверхности отклика добавляются параллельные точки в центре эксперимента, что делает план центральным и симметричным относительно центра. Рекомендуется [90] при числе факторов  $n \leq 5$  использовать полный факторный эксперимент. При ротатабельном планировании выбор числа нулевых точек (в центре эксперимента) оказывается несколько неопределенным, так как изменение их числа не оказывает влияния на ротатабельность плана. Нулевые точки необходимы для оценки ошибок эксперимента и проверки адекватности модели второго порядка, а их количество изменяет вид информационного контура [91].

В качестве критерия оценки работы роторно-ударного измельчителя выбрана мощность привода, необходимая для его работы в установившемся режиме в процессе измельчения различных материалов.

Исследования проводились для ранее принятого значения коэффициента трения ударника по внутренней поверхности корпуса  $f_2 = 0,15$  (при измельчении стальной сферической дроби).

Матрица центрального композиционного ротатабельного униформпланирования второго порядка представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 — Матрица центрального композиционного ротатбельного  
униформпланирования второго порядка

№ п/п	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1x_2$
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	+1	+1	-1
3	+1	-1	+1	+1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	+1	-1,414	0	+2	0	0
6	+1	+1,414	0	+2	0	0
7	+1	0	-1,414	0	+2	0
8	+1	0	+1,414	0	+2	0
9	+1	0	0	0	0	0
10	+1	0	0	0	0	0
11	+1	0	0	0	0	0
12	+1	0	0	0	0	0
13	+1	0	0	0	0	0

Общее число точек эксперимента определяем по формуле:

$$N=2^k + 2k + k_0, \quad (2.20)$$

где  $k = 2$  – число факторов;

$2^k = 4$  – полный факторный эксперимент (ядро плана), представлен в строках 1...4 матрицы планирования;

$2k = 4$  – звездные точки, представлены в строках 5...8 матрицы планирования (величина звездного плеча  $\alpha = 2^{\frac{k}{4}} = 1,414$ );

$k_0 = 5$  – опыты в центре эксперимента (строки 9...13) [90].

Математическая модель второго порядка имеет вид [90, 92–96]:

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (2.21)$$

где  $y$  – функция отклика (расчетное значение критерия оптимизации);

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии;

$x_i$  и  $x_j$  – факторы.

При проведении опытов, необходимых для определения численных значений коэффициентов регрессии, факторы задаются не в натуральном, а в кодовом обозначении, при котором размах их колебаний строго определен в соответствии с типом планирования [91]. Выбор факторов и уровней их варьирования осуществляется с учетом технических характеристик предлагаемого роторно-ударного измельчителя. Интервалы и уровни варьирования указанных факторов отображены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 — Интервалы варьирования факторов

Показатель	$x_1 (m_m)$ , 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

Необходимая масса ударников  $m_m$  обеспечивалась за счет навешивания дополнительной массы на каждый рабочий орган. Среднее отклонение от необходимого уровня варьирования фактора согласно плана не превысило 2,5%.

Число опытов (при доверительной вероятности 0,95 и допустимой ошибке  $\varepsilon = \pm 3\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение результатов опытов) необходимо принимать трехкратным [93].

Коэффициенты регрессии определялись по формулам [90]:

$$b_0 = a_1 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u - a_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{y}_u ; \quad (2.22)$$

$$b_i = a_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u ; \quad (2.23)$$

$$b_{ii} = a_5 \sum_{i=1}^k x_{iu}^2 \bar{y}_u + a_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{y}_u - a_7 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u ; \quad (2.24)$$

$$b_{ij} = a_4 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u , \quad (2.25)$$

где  $x_{iu}$ ,  $y_u$  – соответственно значения фактора и функции отклика в  $u$ -ой строке матрицы планирования.

Для случая двухфакторного эксперимента с числом опытов  $N=13$  коэффициенты равны:  $a_1 = 0,2$ ;  $a_2 = 0,1$ ;  $a_3 = 0,125$ ;  $a_4 = 0,25$ ;  $a_5 = 0,125$ ;  $a_6 = 0,0187$ ;  $a_7 = 0,1$ .

Однородность дисперсий экспериментальных данных проверяем при помощи критерия Кохрена [94]:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S_y^2}, \quad (2.26)$$

где  $S_{\max}$  – максимальная («выделяющаяся») дисперсия;

$S_y$  – дисперсия в каждом из опытов [94]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^u (y_i - \bar{y})^2}{u-1}, \quad (2.27)$$

где  $y_i$  – измеряемые значения;

$\bar{y}$  – среднее (наиболее вероятное) значение измеряемой величины [94];

$u$  – число повторных измерений [94].

Среднее значение измеряемой величины определяется по формуле [93]:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_1^u y_i}{u}. \quad (2.28)$$

Погрешность измеряемой величины по отношению к теоретическому значению определяем по формуле:

$$\Delta = \frac{\Delta y_i}{y_{mi}} 100\%, \quad (2.29)$$

где  $\Delta y_i$  – погрешность измерения:

$$\Delta y_i = \bar{y}_i - y_{mi}, \quad (2.30)$$

$y_{mi}$  – теоретическое значение измеряемой величины.

Дисперсию коэффициентов регрессии, используемую при определении их значимости, вычисляли по формулам [92]:

$$S_{b_0}^2 = \frac{2A\lambda_4^{*2}(k+2)S_y^2}{N}; \quad (2.31)$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{CS_y^2}{N}; \quad (2.32)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = \frac{A((k+1)\lambda_4^* - (k-1))C^2S_y^2}{N}; \quad (2.33)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = \frac{C^2S_y^2}{\lambda_4^*N}, \quad (2.34)$$

где  $k_c = N - k_0$  – число периферийных точек матрицы планирования;

$k_0$  – число опытов в центре плана ( $x_i = 0$ ).

$$\lambda_4^* = \frac{k(k_0 + k_c)}{(k+2)k_c}; \quad (2.35)$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{\lambda_4^*(k+2)}{k}}; \quad (2.36)$$

76

$$C = \frac{1}{\lambda_2}; \quad (2.37)$$

$$A = \frac{1}{2\lambda_4^* \left( (k+2)\lambda_4^* - k \right)}. \quad (2.38)$$

При  $k = 2$ ,  $N = 13$ ,  $k_0 = 5$ ,  $k_c = 8$  приведенные величины равны:  
 $\lambda_4^* = 0,81$ ;  $A = 0,49$ ;  $\lambda_2 = 1,27$ ;  $C = 0,78$ .

Значимость коэффициентов определяем по критерию Стьюдента [88]:

$$t = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}. \quad (2.39)$$

Табличное значение критерия Стьюдента  $t_m = 2,16$  [92] при числе степеней свободы  $f = N(n-1) = 13$ . Путем сравнения  $t_3$  и  $t_m$  незначимые коэффициенты исключаем из уравнений регрессии.

Адекватность модели определяем по  $F$ -критерию (критерию Фишера), который для ротатабельного плана имеет вид [92]:

$$F = \frac{SS_{LF}}{f_{LF}} : \frac{SS_E}{f_E}, \quad (2.40)$$

где  $SS_{LF} = SS_R - SS_E$  – сумма квадратов, связанная с остаточной дисперсией неадекватности;

$$SS_R = \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y^*)^2 \quad \text{– остаточная сумма квадратов, связанная с остаточной}$$

дисперсией;

$\bar{y}_u$ ,  $y^*$  – соответственно опытное и предсказанное уравнением регрессии значение функции отклика;

$$SS_E = \sum_{u=1}^{k_0} (\bar{y}_{ou} - y^*)^2 \quad \text{— сумма квадратов, связанная с дисперсией ошибки}$$

опыта;

$\bar{y}_{ou}$  — среднее значение функции отклика в центре эксперимента;

$f_E, f_{LF}$  — соответствующие числа степеней свободы:

$$f_E = k_0 - 1 = 5 - 1 = 4; \quad (2.41)$$

$$f_{LF} = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (k_0 - 1) = 3. \quad (2.42)$$

При уровне значимости  $q=0,05$  [92] табличное значение критерия Фишера  $F_{табл} = 6,59$  [91].

Для реализации экспериментов обеспечивались сочетания уровней варьирования в соответствии с матрицей планирования эксперимента.

## Выводы к разделу 2

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процесса разрушения материалов прямым стесненным ударом по определению затрачиваемой энергии для раскалывания одиночных частиц и слоя дробы. Для исследования процесса разрушения одиночных образцов дробы стесненным ударом разработана лабораторная установка (вертикальный копер с падающим грузом), для измельчения слоя дробы использовался маятниковый копер.

2. Описана методика исследования процесса измельчения дробы в роторно-ударном измельчителе. В качестве метода многофакторных экспериментальных исследований использовалось центральное композиционное ротатабельное униформпланирование второго порядка. Для проведения экспериментальных исследований процесса разрушения стальной дробы и обоснованная основных конструктивно-технологических параметров дробильно-измельчительной машины

изготовлена лабораторная установка, включающая в себя физическую модель роторно-ударного измельчителя, инвертора (преобразователя постоянного напряжения в переменное) серии А2, цифрового многофункционального реле МР63. Снятие экспериментальных данных осуществлялось стандартными измерительными средствами и приборами.

3. При обработке результатов проведенных лабораторных опытов и испытаний роторно-ударного измельчителя применялись общепринятые методы анализа и математической статистической обработки данных с использованием критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера, а также с помощью метода определения относительной погрешности.

**РАЗДЕЛ 3****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ  
СТАЛЬНОЙ ДРОБИ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-  
УДАРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ****3.1 Особенности реализации свободного и стесненного удара в дробильно-  
измельчительных процессах**

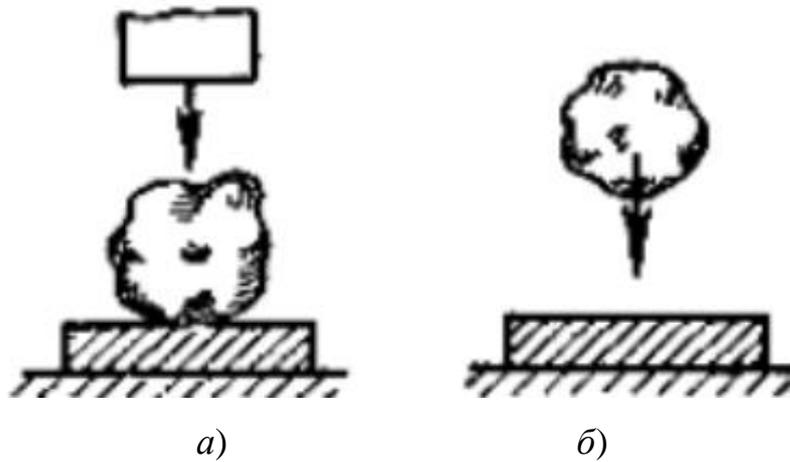
В современной промышленности огромное значение уделяется вопросам технического переоснащения техники и развития существующих технологий, что является адекватной реакцией с точки зрения экономической составляющей производственных процессов, тесно связанной с экономией электроэнергии и природных ресурсов.

При этом известно [12, 97], что огромная доля затраченной энергии потребляется дробильно-измельчительными процессами при фракционной подготовке различных материалов на получение наиболее рационального фракционного состава сырья.

Из проведенного аналитического обзора следует, что свободный удар обладает сравнительно низкими энергозатратами и является относительно легко реализуемым на практике [35]. При этом диспергирование частиц дробы округлой формы может достигаться путем ударного контакта с неподвижной преградой в машинах разгонно-ударного типа, которые обладают при равной производительности меньшей установленной мощностью, так как минимизируются все контактные явления, свойственные смятию и уплотнению материала. На создание зон контакта тратится около 95...97% энергии [98] по сравнению с энергией для условий раскалывания между дробящими поверхностями при кратковременности и высокой интенсивности нагрузки [99].

В этом случае для реализации процесса разрушения частицы дробы необходимо придать критическую скорость, обеспечивающую гарантированное разрушение дробы сферической формы, желательно при однократном ударе.

Однако с точки зрения реализации ударного воздействия более целесообразным представляется применение «стесненного» удара (удара «молота по наковальне»), когда тело разрушается между поверхностями двух сжимающих его рабочих органов, вместо «свободного» ударного контакта (см. рисунок 3.1), при этом преимуществом может являться то, что разрушающие силы направлены навстречу друг другу.



*a* — стесненный удар; *b* — свободный удар

Рисунок 3.1 — Способы разрушения материалов различными видами ударного воздействия

В подразделе 3.2 представлен сравнительный анализ результатов моделирования процесса разрушения дробы при «свободном» и «стесненном» ударе для дальнейшего обоснования и выбора способа деформации стальной сферической дробы для ее разрушения в процессе измельчения в предлагаемой измельчительной машине.

### **3.2 Моделирование процесса разрушения стальной сферической дроби различными видами ударного контакта**

При моделировании нагружения и разрушения стальной сферической дроби различными видами удара применялся программный комплекс ANSYS Workbench [100, 101]. Преимуществами данного программного комплекса является возможность решения нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов различных конструкций твердых тел), в котором моделирование и анализ позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование — изготовление — испытания».

#### **3.2.1 Конечно-элементное моделирование процесса свободного ударного контакта стальной дроби о неподвижную преграду**

При подготовке и реализации технического решения, реализуемого с помощью модели, разработанной на основании метода конечных элементов, разрушаемому образцу материала (стальной сферической дроби) придавалось конкретное значение скорости свободного движения к неподвижной абсолютно недеформируемой поверхности.

В процессе моделирования процесса разрушения твердотельной модели в программном комплексе ANSYS Workbench материалу разрушаемого образца задавались следующие параметры его основных физико-механических свойств: объемная плотность —  $7820 \text{ кг/м}^3$ ; модуль упругости —  $2,0 \times 10^{11} \text{ Па}$ ; модуль сдвига —  $7,8 \times 10^9 \text{ Па}$ ; коэффициент Пуассона —  $0,25$ ; предел прочности на растяжение (сжатие) —  $1020,0 \text{ МПа}$ . Данные значения свойств соответствуют характеристикам стальной сферической дроби, производимой в условиях ООО «Завод стальной дроби» [11, 17, 21].

Силами трения между поверхностью твердотельной модели дробинки и поверхностью плиты и силой тяжести дробинки пренебрегали.

Твердотельной модели дробинки диаметром 1,8 мм (данная фракция наиболее распространена в производстве стальной остроугольной колотой дроби) задавалась скорость свободного линейного движения к поверхности неподвижной плиты в диапазоне до 150 м/с. Большие скорости весьма проблематично реализовать в промышленных условиях с помощью роторных, ударно-разгонных и центробежных дробилок, у которых линейная скорость ускорителя обычно не превышает 100 м/с.

Схема нагружения дроби свободным ударом о неподвижную преграду в программном комплексе Ansys Workbench представлена на рисунке 3.2.

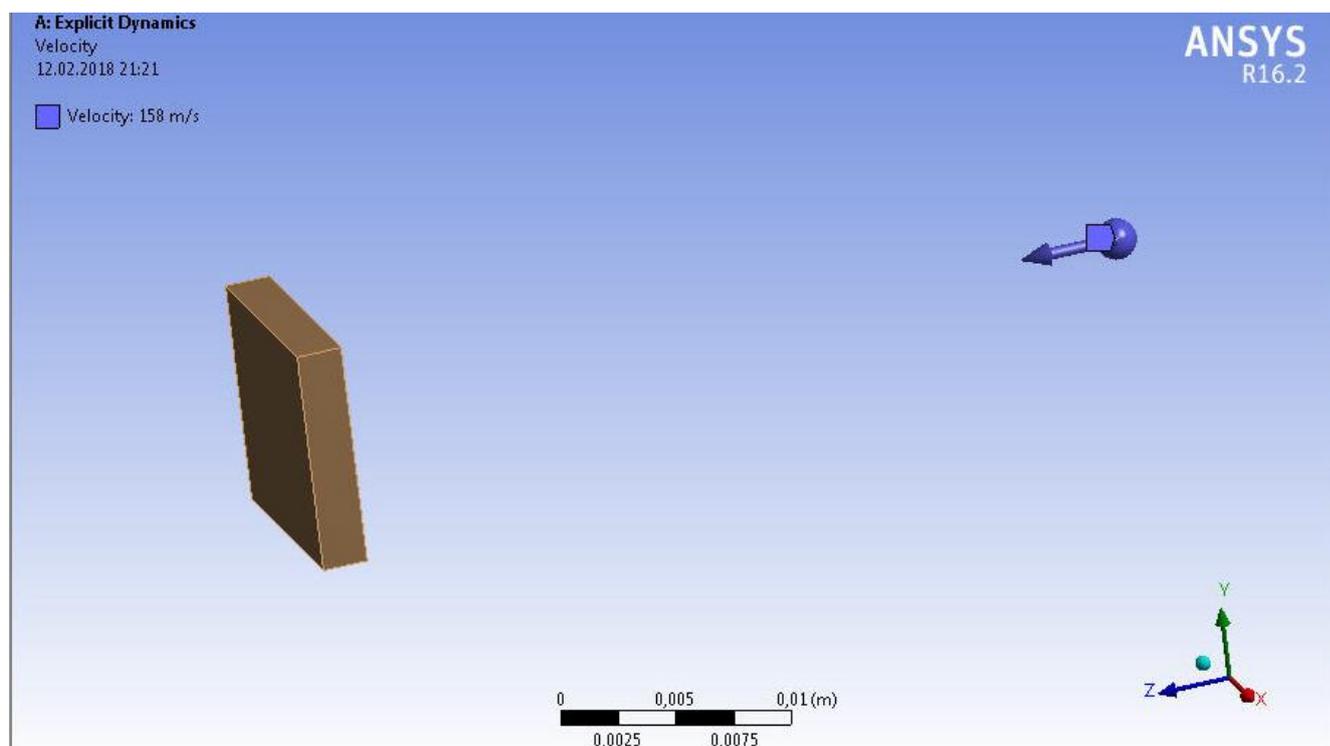


Рисунок 3.2 — Твердотельная модель и схема нагружения дроби свободным ударом о неподвижную преграду в программном комплексе Ansys Workbench

Затем фиксировалось распределение, а также значения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу [102] в теле образца в момент соударения стальной дроби с неподвижной преградой (см. рисунок 3.3).

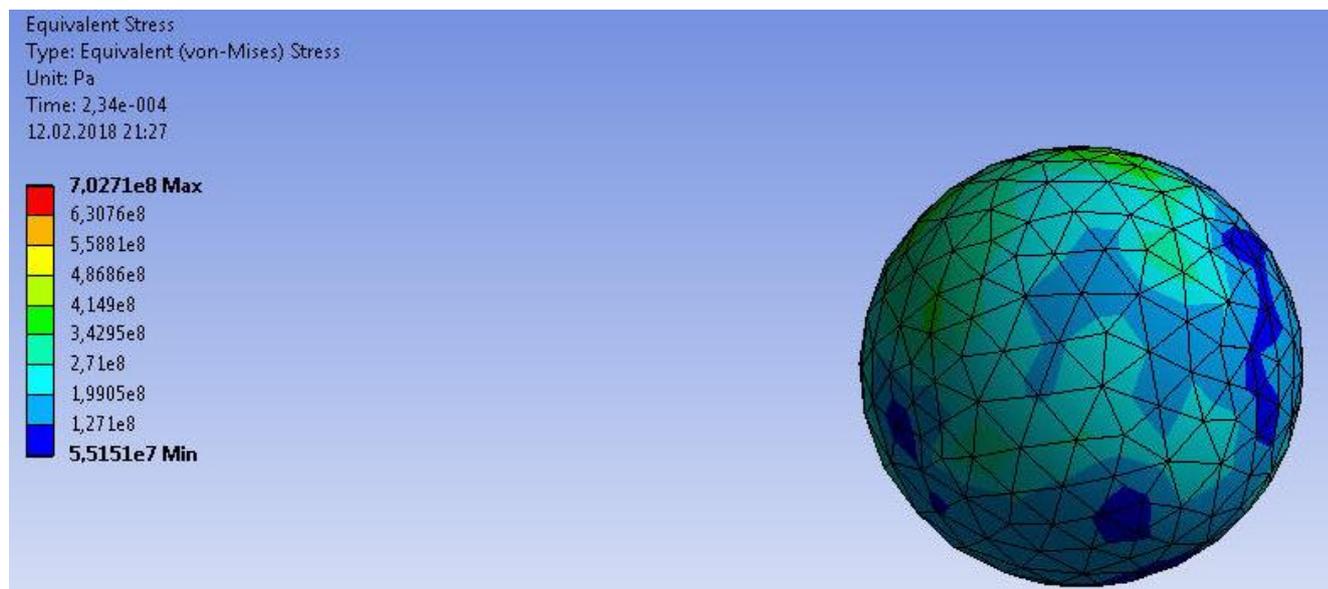


Рисунок 3.3 — Распределение эквивалентных напряжений в теле образца в момент его соударения с плитой

Как видно из результатов моделирования при скоростях свободного соударения, реализуемых в различных видах ударных дробилок, не возможно обеспечить нагружение стальной сфероидной дроби до возникновения в теле напряжений, превышающих предел прочности. Максимальные напряжения в теле составили 702,7 МПа, что значительно меньше предела прочности на сжатие (растяжение) исследуемой стали 1020,0 МПа. Отсюда видно, что энергия, направленная на разрушение при заданных условиях, является недостаточной. То есть наблюдается отскакивание объекта от абсолютно жесткой отбойной плиты. При этом происходит лишь незначительная деформация в области контакта.

Анализ результатов исследований показал, что для обеспечения раскалывания стальной дроби единичным центральным ударом необходимо достижение больших скоростей близких к скорости звука. Данное обстоятельство можно отнести к недостаткам создания машины, так как снижает ее работоспособность за счет необходимости точной балансировки и возможного нарушения технологических режимов во время работы. Кроме того, повышенная скорость вылета частиц нежелательна по условиям безопасности обслуживающего персонала и выдвигает

дополнительные жесткие требования к надежности бронирования корпуса и его высокой износостойчивости.

### 3.2.2 Конечно-элементное моделирование процесса разрушения стальной дроби в условиях стесненного удара «молот по наковальне»

При разработке технического решения, направленного на исследование процесса разрушения дроби стесненным ударом, реализуемого с помощью модели, разработанной на основании метода конечных элементов, разрушаемый образец материала располагался между двумя абсолютно гладкими недеформируемыми сжимающими поверхностями, одна из которых неподвижна, а вторая подвергалась воздействию переменной по времени силой (см. рисунок 3.4).

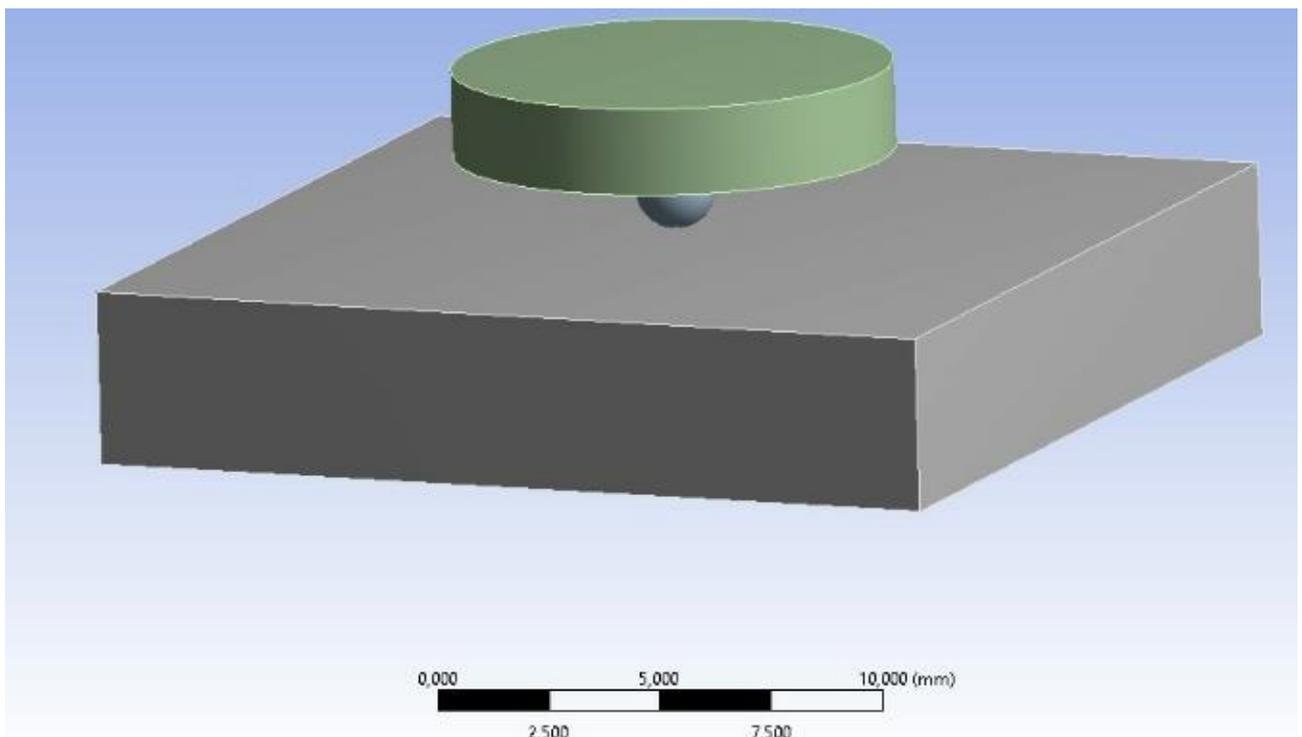


Рисунок 3.4 — Твёрдотельная модель и схема нагружения дроби стесненным ударом в программном комплексе Ansys Workbench

Физико-механические свойства твердотельной модели принимались аналогично исследованию нагружения дроби свободным ударом о неподвижную пре-

граду. Силами трения между поверхностью твердотельной модели дробинки и поверхностью плиты и силой тяжести дробинки пренебрегали.

Затем фиксировались эквивалентные напряжения в теле образца (см. рисунок 3.5).

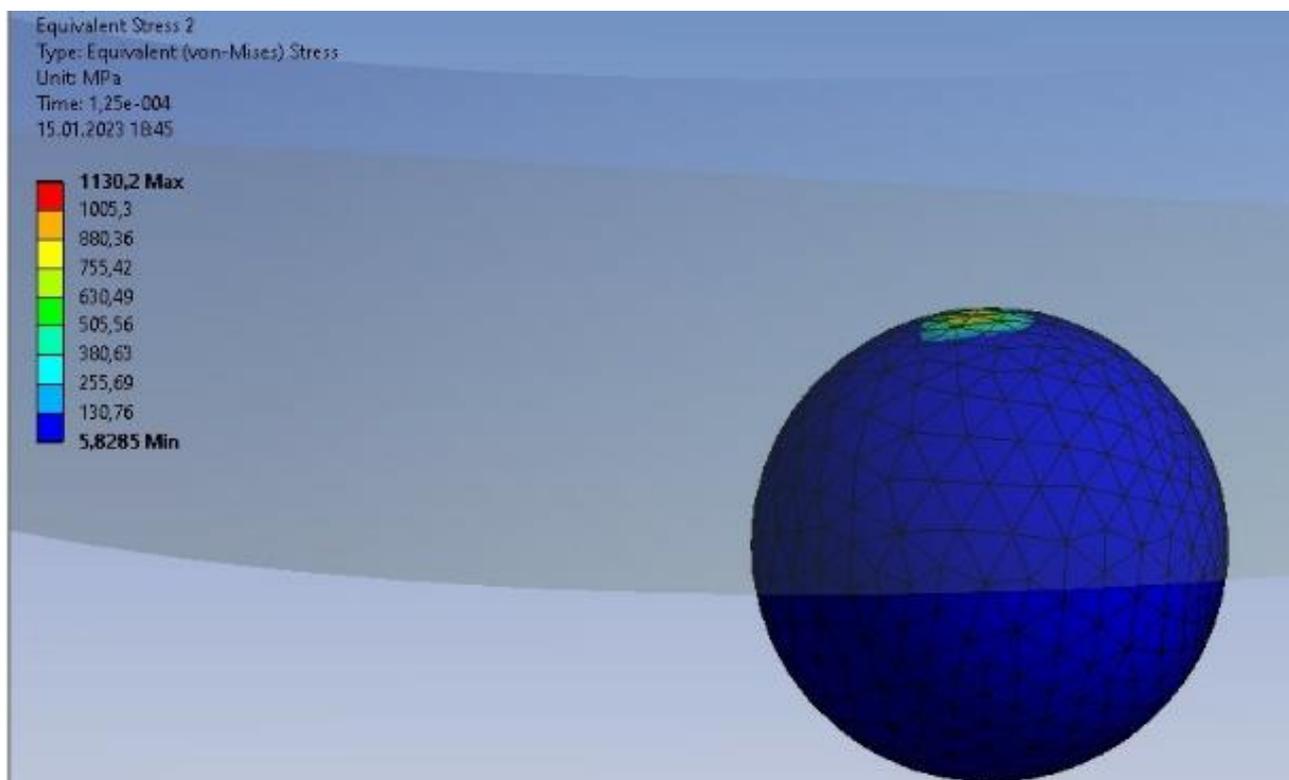


Рисунок 3.5 — Значения эквивалентных напряжений в теле образца при его нагружении стесненным ударом

Как видно из результатов моделирования процесса нагружения твердотельной модели максимальные напряжения в теле при нагружении стесненным ударом составили 1130,2 МПа, которые превышают значение предела прочности материала дроби 1020,0 МПа, что обосновывает эффективность данного способа разрушения стальной сферической дроби.

С учетом вышесказанного при однократном ударном воздействии целесообразнее применение «стесненного» удара, когда тело разрушается между двумя рабочими органами, вместо «свободного».

В этой связи наиболее рациональным является разработка и создание роторно-ударного измельчителя, обеспечивающего подъем и падение мелющих тел

в виде массивных грузов с прямыми рабочими поверхностями или же с формой поверхности близкой к рабочей поверхности наковальни, что, по сути, обеспечивает воздействие на дробь такое же, как и осуществляет молот по наковальне.

В связи с тем, что подобных конструкций не только для раскалывания дроби, но и фракционной подготовки иных материалов не выявлено среди широкого спектра типового оборудования, требуется всестороннее изучение процессов, реализующих данный способ на практике.

### 3.3 Структурный анализ роторно-ударного измельчителя

Структурную схему роторно-ударного измельчителя (см. рисунок 3.6) можно представить в виде совокупности ее отдельных подсистем [103], включающих в себя основные элементы технологического процесса, а именно:

- подачу дроби сферической формы в рабочую камеру измельчителя;
- обеспечение процесса раскалывания путем падения мелющих тел на частицы дроби, располагающиеся в зоне действия удара на броневого футеровке;
- удаление продуктов разрушения из рабочей зоны.

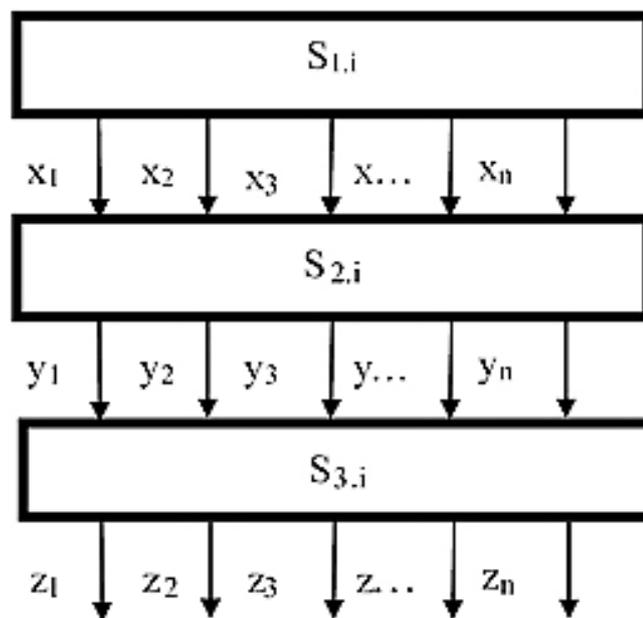


Рисунок 3.6 — Структурная схема процесса раскалывания дроби в роторно-ударном измельчителе

Каждая из представленных подсистем выполняет только свойственную ей специфическую функцию, переводя систему из предшествующего предыдущего состояния  $S_{1,i}$  с параметрами  $x_{11}, x_{12}, x_1 \dots$  и  $x_{1n}$  в последующие состояния  $S_{2,i}$  с параметрами  $y_{21}, y_{22}, y_2 \dots$  и  $y_{2n}$  и  $S_{3,i}$  с параметрами  $z_{31}, z_{32}, z_3 \dots$  и  $z_{3n}$ . Это позволяет в полной мере выявить влияние важнейших параметров на каждой подсистеме в отдельности и в конечном итоге провести их обобщение для машины в целом.

Обеспечение процесса раскалывания стальной дробы круглой формы за счет падения мелющих тел обеспечивается подсистемой  $S_{2,i}$ , согласно структурной схеме (см. рисунок 3.6).

### **3.4 Математическая модель процесса ударного контакта мелющих тел с дробимым материалом**

Для определения указанных параметров при аналитических расчетах приняты следующие допущения [104]:

- частица дробы представлена в виде шара;
- силами трения при ударе пренебрегают;
- при раскалывании на все частицы дробы воздействует прямой центральный упругий удар;
- при относительном движении рабочих органов принято, что происходит сухое трение, влиянием скорости на коэффициент трения пренебрегаем;
- центр тяжести половины мелющего тела условно принят расположенным в центре тяжести ударного элемента;
- при ударном контакте мелющих тел со слоем дробы относительное движение (скольжение) по поверхности дробимого материала отсутствует.

Для обеспечения требуемой производительности ударного роторного измельчителя необходимо реализовать гарантированное разрушение (раскалывание) материала при одиночном ударном взаимодействии мелющего тела (ударника) с необходимым количеством дробимого материала, определяемым по следующей зависимости:

$$N_{op} = \frac{3 \cdot M_{\partial}}{120 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d^3 \cdot n_p \cdot N_{y\partial}}, \quad (3.1)$$

где  $M_{\partial}$  — массовая производительность ударного измельчителя, т/ч;

$\rho$  — плотность дробимого материала, т/м<sup>3</sup>;

$d$  — средний диаметр дробинки, м;

$n_p$  — частота вращения ротора, об/мин;

$N_{y\partial}$  — число мелющих тел на роторе, шт.

Для раскалывания дробы необходимо создать при ударе по ней достаточное напряжение, необходимое для разрушения [105, 106].

При контакте мелющего тела с дробинками, находящимися на внутренней рабочей поверхности корпуса, происходит деформация (сжатие), при котором предельные условия перехода в пластическое состояние и критерий разрушения целостности дробимого материала имеет следующий вид [106, 107, 108]:

$$\sigma_{дин} \leq \sigma_{y\partial} \quad (3.2)$$

где  $\sigma_{дин}$  — динамический предел прочности материала раскалываемой дробинки, МПа [106]:

$$\sigma_{дин} = k_{\partial} \cdot \sigma_{ст.сж}, \quad (3.3)$$

где  $k_{\partial}$  — коэффициент отношения динамического предела прочности материала к статическому (определяется экспериментально или на основании предыдущих исследований [107, 108]);

$\sigma_{ст.сж}$  — статический предел прочности на сжатие материала, МПа [106].

Статический предел прочности на сжатие для сталей значительно превышает предел прочности при растяжении и может быть определен как:

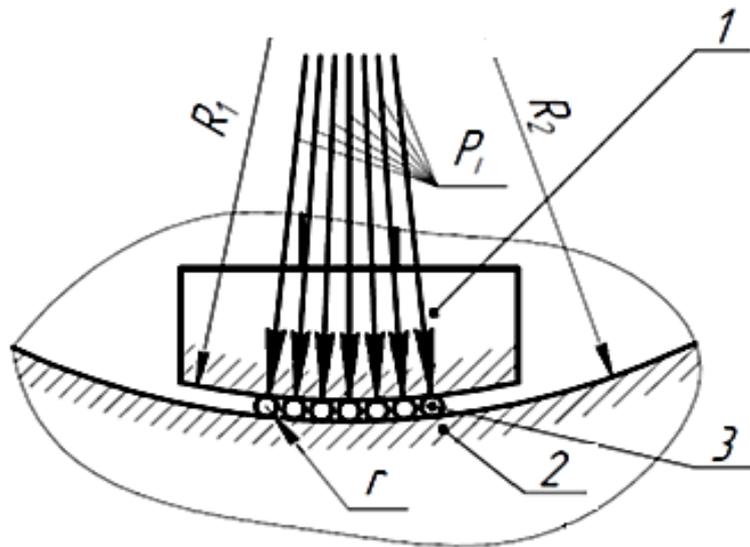
$$\sigma_{ст.сж} = k_{\sigma} \cdot \sigma_{ст.р}, \quad (3.4)$$

где  $k_{\sigma}$  — коэффициент пропорциональности статического и динамического пределов прочности материала [106];

$\sigma_{ст.р}$  — статический предел прочности на растяжение дробимого материала, МПа [106];

$\sigma_{уд}$  — напряжение, возникающее в отдельных дробинках при соударении с мелющим телом, МПа.

Процесс ударного разрушения дробы между мелющими телами и рабочей поверхностью корпуса измельчителя представлен на рисунке 3.7 [109, 110].



1 — мелющее тело; 2 — рабочая поверхность корпуса; 3 — слой дробы

Рисунок 3.7 — Расчетная схема процесса контактного взаимодействия мелющего тела при ударе по дробы, находящейся на рабочей поверхности корпуса

Напряжение, возникающее в раскалываемом материале при ударе мелющего тела по слою дробы, находится с помощью модели упругого контакта простых поверхностей Герца [111].

В первую очередь необходимо определить величину параметра  $\alpha$ , равного относительному смещению центров масс ударника и дробинки, принятого называть местным смятием тел. Термин «смятие» употребляется потому, что относительное перемещение соударяемых тел при силовом контакте происходит в основном вследствие деформации (смятия) их в зоне касания [111].

В момент обращения скорости относительного смещения  $\dot{\alpha}$  при ударном контакте в нуль его величина достигает максимального значения  $\alpha_{\max}$  и равна:

$$\alpha_{\max} = \left( \frac{10 \cdot m_m \cdot V^2}{4 \cdot K} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (3.5)$$

где  $m_m$  — масса мелющего тела (ударника), кг;

$V$  — скорость ударника при ударном контакте с дробью [107, 108], м/с;

$K$  — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материалов ударника и дробы:

$$K = \frac{4 \cdot \sqrt{\frac{r \cdot R_1}{r + R_1}}}{3 \cdot \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (3.6)$$

где  $r$  — радиус дробинки, м;

$R_1$  — радиус окружности рабочей поверхности мелющего тела, м;

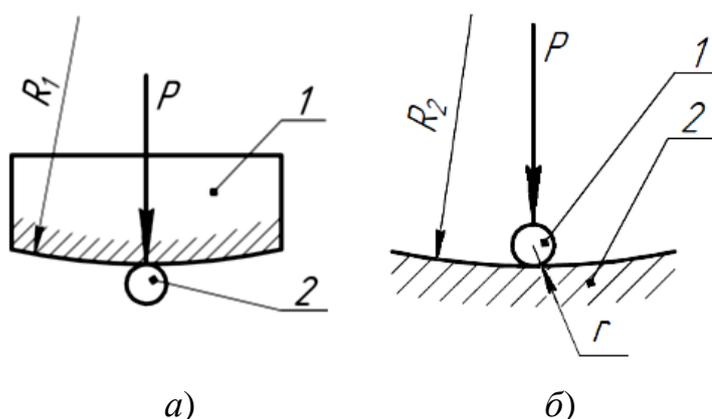
$\mu_1, \mu_2$  — коэффициенты Пуассона материалов ударника и дробинки соответственно;

$E_1$  и  $E_2$  — модули упругости материалов ударника и дробинки соответственно.

Согласно данным [111] сила удара мелющего тела по телу определяется как:

$$P = K \cdot \left( \frac{5 \cdot m_m \cdot V^2}{4 \cdot K} \right)^{\frac{3}{5}}. \quad (3.7)$$

Условия в зоне контакта с ударником и рабочей поверхностью корпуса показаны на рисунке 3.8.



*a* — в зоне контакта с мелющим телом (1 — ударник; 2 — дробинка); *б* — в зоне контакта с рабочей поверхностью корпуса (1 — ударник; 2 — корпус)

Рисунок 3.8 — Расчетная схема для определения основных параметров контактного взаимодействия мелющего тела при ударе по дробе

При ударном контакте происходит деформация взаимодействующих тел и возникают напряжения, определяемые по зависимостям, основанных на решении задачи Герца об упругом контакте тел сферической формы, имеющих решение в замкнутой форме [105, 112]:

– для контакта с рабочей поверхностью ударника и дробинки (см. рисунок 3.8, *a*):

$$Q_1 = 0,918 \cdot \sqrt[3]{P \frac{\left( \frac{r + R_1}{2 \cdot r \cdot R_1} \right)^2}{\left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}}. \quad (3.8)$$

– для контактного взаимодействия дроби с рабочей поверхностью корпуса измельчителя (см. рисунок 3.8, б):

$$Q_2 = 0,918 \cdot \sqrt[3]{P \frac{\left(\frac{R_2 - r}{2 \cdot r \cdot R_2}\right)^2}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)^2}}, \quad (3.9)$$

где  $R_2$  — радиус кривизны рабочей поверхности корпуса измельчителя, м.

Для определения максимального напряжения необходимо сравнить значения напряжений, возникающих при контакте с ударником и корпусом.

По результатам численного решения определено, что наибольшее напряжение в дробинке возникает в зоне контакта с ударником.

Можно предположить, что соударение мелющего тела происходит одновременно с поверхностью всех дробинок в слое (то есть они имеют все одинаковые геометрические размеры). А также они обладают идентичной структурой и физико-механическими характеристиками. В этом случае сила удара равномерно распространяется на весь слой дробимого материала. Таким образом формула, основанная на теории контактного взаимодействия Герца [112], для определения касательного напряжения, возникающего на площадке контакта двух тел будет иметь вид:

$$Q = 0,195 \cdot \frac{\sqrt[5]{V^2 \cdot m_m \cdot \Theta^4 \cdot R_{np}^3}}{\sqrt[3]{N_{op}}}, \quad (3.10)$$

где  $\Theta$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материалов:

$$\Theta = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 \cdot (1 - \mu_1^2) - E_2 \cdot (\mu_2^2 - 1)}, \quad (3.11)$$

$R_{np}$  — приведенный радиус кривизны поверхности контактирующих тел:

$$R_{np} = \frac{r \cdot R_1}{r + R_1}. \quad (3.12)$$

Из формулы (3.10) получается зависимость для определения максимального количества дробинок, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации прямого одиночного стесненного удара мелющего тела:

$$N_{op} = 7,42 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\sqrt[5]{(V^2 \cdot m_m \cdot \Theta^4 \cdot R_{np}^3)^3}}{(\sigma_{дин})^3}. \quad (3.13)$$

Для наглядного отображения зависимости количества дробинок, раскалываемых одиночным ударом мелющего тела от его массы и скорости при взаимном контакте с материалом на рисунке 3.9 показан график поверхности в зависимости от массы ударника в пределах от 50 до 200 кг и от скорости ударного контакта от 1 до 3 м/с.

При выполнении расчетов задавались следующие значения параметров зависимости (2.39): материал дроби – сталь литая 80ГСЛ [5] с твердостью 450...470 НВ и пределом временного сопротивления 1020 МПа крупностью 3 мм. При этом радиус кривизны рабочей ударной поверхности мелющего тела задавался 1 м. Модуль упругости и коэффициент Пуассона для стали принимались 200 ГПа и 0,33 соответственно.

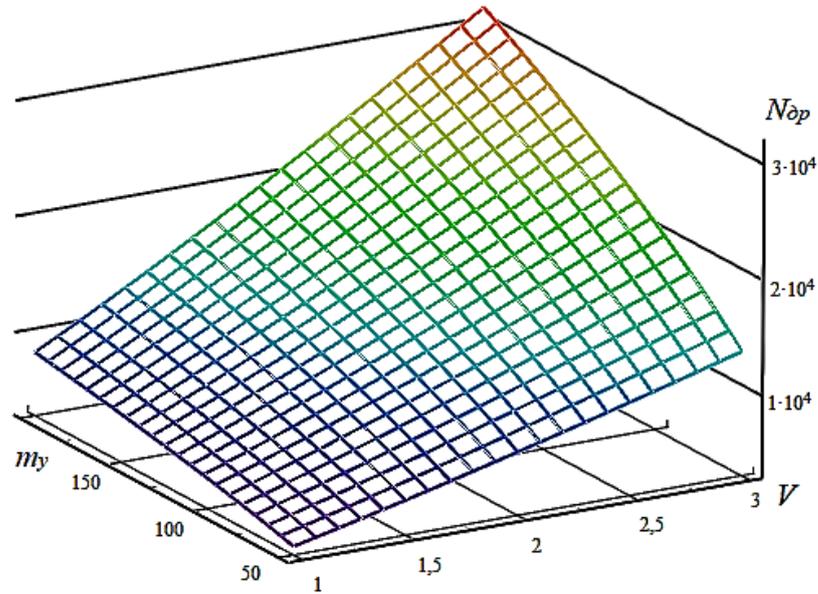
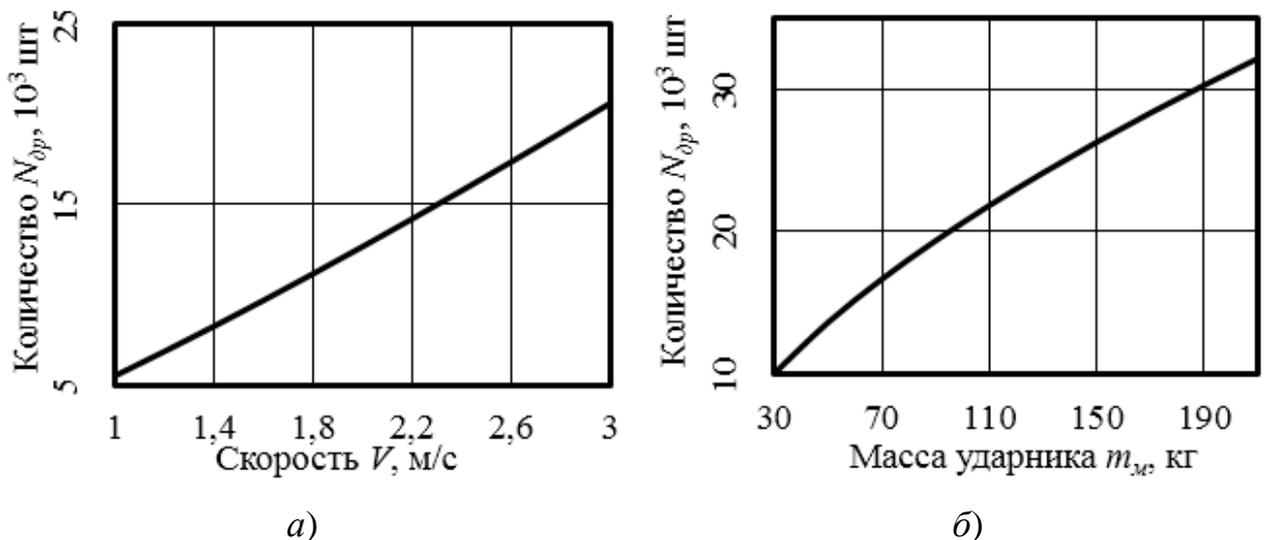


Рисунок 3.9 — График зависимости количества раскалываемых частиц дробы одиночным ударом мелющего тела от массы ударного элемента и его скорости

Для наглядного отображения влияния величин массы и скорости ударника на количество расколотых дробинок отображены графики зависимости с фиксированными значениями  $V=3$  м/с (см. рисунок 3.10, а) и  $m_m=100$  кг (см. рисунок 3.10, б).



а — при фиксированном значении массы ударника  $m_m=100$  кг;

б — при фиксированном значении скорости ударника  $V=3$  м/с;

Рисунок 3.10 — Графики теоретических зависимостей зависимости количества дробы, раскалываемой одиночным ударом мелющего тела

Как видно из представленных зависимостей, скорость ударника влияет на количество раскалываемых частиц дробы в степенной зависимости с показателем больше единицы, а масса ударника — в степенной зависимости с положительным показателем меньше единицы.

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

– для определения требуемой массы ударника:

$$m'_m = \frac{3,6 \cdot 10^3 (\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{V^2 R_{np}^3}. \quad (3.14)$$

– для определения необходимой линейной скорости движения ударника при ударном контакте с дробью (скорость соударения):

$$V = 59,6 \sqrt{\frac{(\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{m_m R_{np}^3}}. \quad (3.15)$$

Таким образом, определены зависимости для расчета основных конструктивно-технологических параметров ударных элементов дробильной машины, обеспечивающих раскалывания необходимого количества дробы при стесненном ударе.

### 3.5 Определение основных параметров подачи исходного сырья в рабочую камеру шлюзовым питателем

В связи с тем, что в виде исходного сырья выступают частицы стальной дроби округлой формы, близкие к сферическим, питание измельчителя может эффективно осуществляться шлюзовым (секторный) питателем [113, 114] (см. рисунок 3.11), преимуществами которого являются простота конструкции и установки, автономность функционирования и надежность в эксплуатации при точной дозировке подаваемых компонентов.

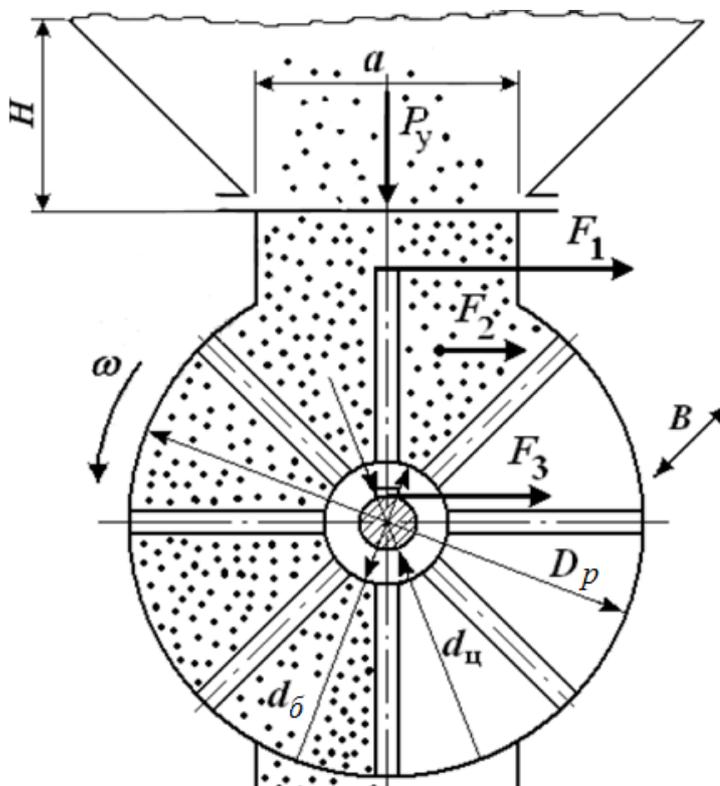


Рисунок 3.11 — Схема шлюзового питателя

Расчет питателя осуществляется по типовой методике [115], предусматривающей определение его основных параметров.

Производительность питателя [115]:

$$Q_n = V_0 \cdot n_0 \cdot \rho \cdot z \cdot \varphi, \text{ кг/мин} \quad (3.16)$$

где  $V_0$  — объем одной ячейки, м<sup>3</sup>;

$n_0$  — частота вращения барабана, об/мин;

$\rho$  — объемная масса стальной дроби сферической формы, кг/м<sup>3</sup>;

$z$  — количество ячеек барабана, шт.;

$\varphi$  — коэффициент заполнения объема ячейки (0,7...0,8).

В. Н. Романов [116] считает, что коэффициент заполнения для сферических тел, засыпанных в треугольную призму должен составлять 0,675. Однако в его теоретических расчетах не учитывался диаметр частиц, который очевидно будет оказывать существенное влияние. Для частиц стальной дроби коэффициент заполнения определялся экспериментально для разных размеров дроби. Для дальнейших расчетов принималось среднее его значение равное 0,7.

Из формулы (3.16) объем одной ячейки составляет [115]:

$$V_0 = \frac{Q_n}{n_0 \cdot \rho \cdot z \cdot \varphi}, \text{ м}^3. \quad (3.17)$$

Диаметр барабана определяется по формуле [115]:

$$d_0 = \frac{z \cdot l}{\pi}, \text{ м} \quad (3.18)$$

где  $l$  — длина дуги по месту установки лопастей, м.

Рабочий объем питателя с учетом толщины лопастей [115]:

$$V_p = \frac{z \cdot V_0}{K_n}, \text{ м}^3 \quad (3.19)$$

где  $K_n$  — коэффициент, учитывающий уменьшение рабочего объема за счет толщины лопастей (0,9...0,95).

Диаметр ротора по концам лопастей [115]:

$$D_p = \sqrt{\frac{\pi \cdot d^2 + 4 \cdot V_p}{\pi \cdot q_p \cdot B}}, \text{ м} \quad (3.20)$$

где  $B$  — длина питателя, м

$q_p$  — коэффициент рядности.

В формуле (3.20) и в дальнейших расчетах длина питателя при четырехрядной компоновке роторно-ударного измельчителя учтена коэффициентом рядности  $q_p$ , равным для данного случая 4.

Ширина загрузочной и выпускной горловины питателя [115]:

$$a = (0,6 \dots 0,7) \cdot D_p, \text{ м.} \quad (3.21)$$

Скорость истечения материала из бункера в питатель измельчителя находится по формуле [115]:

$$V_{ист} = 5,65 \cdot \mu \cdot \sqrt{R_z}, \text{ м/с} \quad (3.22)$$

где  $\mu$  — коэффициент истечения материала зависит от сыпучести материала (0,4...0,5 — для слабо сыпучих материалов; 0,6...0,7 — для хорошо сыпучих материалов);

$R_z$  — гидравлический радиус загрузочной горловины:

$$R_z = \frac{a \cdot q_p \cdot B}{2 \cdot a + 2 \cdot q_p \cdot B}, \text{ м.} \quad (3.23)$$

Производительность по истечению материала через загрузочную горловину [115]:

$$Q_{уст} = V_{уст} \cdot a \cdot q_p \cdot B, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.24)$$

Условие обеспечения требуемой производительности [115]:

$$Q_{уст} > \frac{Q_n}{3,6 \cdot \rho_n}. \quad (3.25)$$

Вертикальное давление от массы материала, действующее в загрузочной горловине питателя [115]:

$$P_y = \rho_n \cdot g \cdot H \cdot K_z, \text{ Па} \quad (3.26)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;

$H$  — высота загрузки бункера, м;

$K_z$  — коэффициент зависания материала (0,8...0,9).

Боковое давление, действующее на торцевые крышки питателя [115]:

$$P_x = P_y \cdot \varepsilon, \text{ Па} \quad (3.27)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент бокового давления:

$$\varepsilon = \frac{1 - \sin^2 \tau}{1 + \sin^2 \tau}, \quad (3.28)$$

где  $\tau$  — угол естественного откоса дробы.

Сдвигающая сила на концах лопастей:

$$F_1 = P_y \cdot a \cdot q_p \cdot B \cdot f_{\text{вн}}, \text{ Н}, \quad (3.29)$$

где  $f_{\text{вн}}$  — коэффициент внутреннего трения материала ( $f_{\text{вн}} = \text{tg} \tau = 0,36$ ).

Сила трения материала о боковые стенки питателя:

$$F_2 = 2 \cdot \left( P_x \cdot \frac{\pi \cdot (D_p^2 - d_{\bar{o}}^2)}{4} + \frac{3}{4} \cdot V_0 \cdot z \cdot \rho_n \cdot g \cdot \varepsilon \right) \cdot f, \text{ Н} \quad (3.30)$$

Масса барабана питателя:

$$m_{\bar{o}} = \left( \frac{\pi \cdot d_{\bar{o}}^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d_{\bar{o}} - t_{\text{л}})^2}{4} \right) \cdot q_p \cdot B \cdot \rho_{\text{см}} + z \cdot \left( \frac{D_p - d_{\bar{o}}}{2} \cdot q_p \cdot B \cdot t_{\text{л}} \right) \cdot \rho_{\text{см}}, \text{ кг}, \quad (3.31)$$

где  $t_{\text{сжс}}$  — толщина стенки барабана, м (принимается конструктивно);

$t_{\text{л}}$  — толщина лопасти, м (принимается конструктивно  $t_{\text{л}}=0,035$ ).

Сила сопротивления в подшипниковых опорах барабана:

$$F_3 = (P_y \cdot a \cdot q_p \cdot B + z \cdot V_0 \cdot \rho_n \cdot g + m_{\bar{o}} \cdot g) \cdot f_u, \text{ Н}, \quad (3.32)$$

где  $f_u$  — коэффициент сопротивления в подшипниках качения (0,03...0,06).

Момент сопротивления вращению ротора питателя:

$$M_n = F_1 \cdot \frac{D_p}{2} + F_2 \cdot \left( \frac{D_p - d_{\bar{o}}}{4} + \frac{d_{\bar{o}}}{2} \right) + F_3 \cdot \frac{d_u}{2}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (3.33)$$

где  $d_y$  — диаметр сердечника вала питателя, м (см. рисунок 3.4).

Угловая скорость вращения барабана:

$$\omega_{\delta} = \frac{\pi \cdot n_{\delta}}{30}, \text{ с}^{-1}. \quad (3.34)$$

Мощность, необходимая для привода питателя:

$$N_n = \frac{M_n \cdot \omega_{\delta}}{1000 \cdot \eta_{np}}, \text{ кВт}, \quad (3.35)$$

где  $\eta_{np}$  — коэффициент полезного действия привода измельчителя (0,85...0,9).

Основные параметры питателя для подачи стальной дроби в измельчитель приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Основные параметры шлюзового питателя

Производительность $Q_n$ , кг/ч	Плотность дроби $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Высота засыпки дроби в бункере $H$ , м	Угол естественного откоса дроби $\tau$ , °	Частота вращения барабана $n_{\delta}$ , об/мин	Число ячеек барабана $z$ , шт.	Длина питания одного ряда $B$ , м
1000	7820	1	20	5	8	0,35

Для обеспечения вращения вала питателя можно использовать привод ротора измельчителя, например, через ременную передачу или независимый электродвигатель номинальной мощностью 2,2 кВт. Для обеспечения вращения привода питателя от привода измельчителя предлагается принять электродвигатель АИР100L6 мощностью 2,2 кВт, так как запас мощности в 1,3 кВт, определяемый как разность между мощностью выбранного двигателя АИР160М4 в 18,5 кВт и расчетной мощностью измельчителя в 17,2 кВт, не достаточен для привода питателя мощностью 2,01 кВт.

### **3.6 Математическое моделирование роторно-ударного измельчителя**

Для моделирования процесса работы роторно-ударного измельчителя необходимо определить условия разрушения дробы стесненным ударом, где важнейшими показателями являются масса ударника (мельющего тела) и его скорость при ударном контакте с дробью. На основании этого можно выявить основные параметры ударного измельчителя, к которым относятся конструктивные параметры (форма и размеры рабочих поверхностей мельющих тел, внутренний радиус рабочей поверхности корпуса, диаметр ротора, количество ударников) и технологические параметры (скорость вращения ротора, мощность привода).

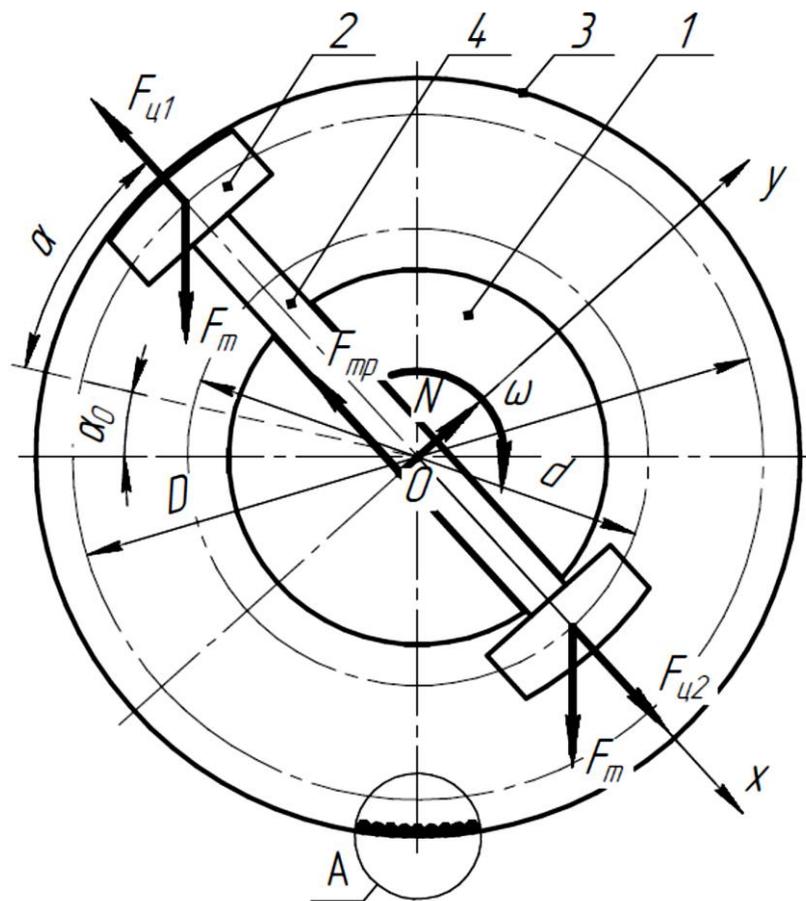
#### **3.6.1 Динамическая модель мельющих тел в рабочем пространстве роторно-ударного измельчителя**

Анализ кинематики и динамики системы ротор-шток-ударники на примере расчетной схемы участка ротора ударного измельчителя, представленной на рисунке 3.12, рассматривается при вращательном движении ротора измельчителя и вращательно-поступательном движении ударника относительно направляющих ротора.

Для обеспечения прямого (центрального) стесненного удара, обеспечивающего наибольшую эффективность разрушения материала, необходимо, чтобы со-

ударение ударника обеспечивалось с дробью, находящейся в нижнем секторе корпуса измельчителя (сектор А). Выполнение этого условия зависит от следующих параметров:

- рабочих радиусов вращения мелющих тел в их верхнем  $R$  и нижнем положениях относительно центра вращения ротора  $r$ , м;
- угловой скорости вращения ротора  $\omega$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;
- коэффициента трения материалов штока ударника по направляющим ротора  $f_1$ .



- 1 — ротор; 2 — ударник; 3 — рабочая поверхность корпуса измельчителя;  
4 — шток

Рисунок 3.12 — Расчетная схема для определения основных параметров движения ударных элементов роторного измельчителя

При вращении ротора необходимо определить основные параметры движения: координату положения и скорость ударника относительно оси вращения ротора в определенный момент времени, зависящий от его угла поворота.

На основании этих параметров требуется найти угловую скорость вращения ротора и коэффициент трения материала, обеспечивающие необходимое условие контактного взаимодействия ударника в нижней (центральной) зоне рабочего пространства (рабочей поверхности) измельчителя.

Также следует определить скорость, при которой произойдет ударный контакт рабочего органа с дробью.

В процессе относительного перемещения ударного элемента по направляющим вала ротора на него действуют следующие силы и реакции: центробежные силы  $F_{y1}$  и  $F_{y2}$ , сила кинетического трения скольжения штока о направляющие ротора  $F_{mp}$ , сила нормальной реакции веса ударников со штоком  $N$  и силы тяжести ударников со штоком  $F_m$  (см. рисунок 3.12).

Для этого можно воспользоваться дифференциальным законом движения (2-ой закон Ньютона) [117]. Векторная форма уравнения движения ударных элементов относительно оси вращения ротора в подвижной системе координат  $xOy$  запишется как:

$$2 \cdot m_m \cdot \bar{a} = \bar{F}_{y1} + \bar{F}_{y2} + \bar{F}_{mp} + 2 \cdot \bar{F}_m, \quad (3.36)$$

где  $\bar{a}$  — ускорение при поступательном движении ударных элементов относительно направляющей ротора, м/с<sup>2</sup>;

$\bar{F}_{y1}$  — центробежная сила ударника, находящегося в верхней точке относительно ротора, Н;

$\bar{F}_{y2}$  — центробежная сила ударника, находящегося в нижней точке относительно ротора, Н;

$\bar{F}_{mp}$  — сила трения, возникающая при скольжении штока ударного элемента по поверхности направляющих ротора, Н;

$\bar{F}_m$  — сила тяжести ударных элементов, Н.

В первую очередь определим положение (угол поворота ротора измельчителя при вращении) исполнительных органов, при котором начнется относительное движение (скольжение) ударного элемента относительно вала ротора.

Для этого рассмотрим систему в состоянии относительного покоя (ударник не перемещается относительно отверстия направляющей ротора измельчителя):

$$\bar{F}_{u1} + \bar{F}_{u2} + \bar{F}_{mp} + 2 \cdot \bar{F}_m = 0. \quad (3.37)$$

Зависимость (3.37) при проецировании векторов сил на подвижные координатные оси  $x$ ,  $y$  (см. рисунок 3.12) при сохранении в первом приближении зависимости для определения силы трения от величины силы нормальной реакции от веса ударников со штоком  $F_{mp} = f_1 \cdot N$  и с учетом того, что центробежные силы при вращении ударников равны  $\bar{F}_{u1} = m_m \cdot \omega^2 \cdot R$  и  $\bar{F}_{u2} = m_m \cdot \omega^2 \cdot r$ , а сила тяжести —  $\bar{F}_m = m_m \cdot g$  и при отсутствии ускорения движения  $\ddot{y} = 0$  дает окончательное уравнение равновесия системы ударник-шток ударника-ротор в проекции на подвижную координатную ось  $x$ :

$$F_{u1} - F_{u2} - 2 \cdot F_m \cdot f_1 \cdot \cos \alpha_0 + 2 \cdot F_m \cdot \sin \alpha_0 = 0. \quad (3.38)$$

После подстановки выражений в символьном виде зависимость (3.38) принимает вид:

$$\omega^2 \cdot (r - R) + 2 \cdot g \cdot \sin \alpha_0 - 2 \cdot f_1 \cdot g \cdot \cos \alpha_0 = 0. \quad (3.39)$$

Решение уравнения (3.39) относительно переменной  $\alpha_0$  дает следующее выражение для определения угла, при котором начнется относительное движение штока ударника относительно ротора при вращении относительно горизонтального положения:

$$\alpha_0 = 2 \cdot \arctan \left( \frac{\sqrt{4 \cdot g^2 \cdot (1 + f_1^2) - \omega^4 \cdot (R - r)^2} - 2 \cdot g}{2 \cdot f_1 \cdot g + \omega^2 \cdot (r - R)} \right). \quad (3.40)$$

Для определения основных параметров относительного движения ударника (зависимости расстояния, пройденного ударником и его линейной скорости относительно оси ротора от времени) рассматривается выражение (3.36) в проекциях векторов сил на подвижные координатные оси  $x$ ,  $y$  (см. рисунок 3.12), связанные с осью ударника в процессе вращения ротора при начальном значении угла поворота ротора  $\alpha = \alpha_0$ .

Угол между направлением вектора силы тяжести и подвижной осью  $x$  определяется по формуле:

$$\alpha' = \alpha_0 + \alpha, \quad (3.41)$$

где  $\alpha$  — угол поворота ротора измельчителя за определенное время, рад:

$$\alpha = \omega \cdot t, \quad (3.42)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$t$  — время движения, с.

Окончательное дифференциальное уравнение относительного движения ударника по поверхности направляющих штока ротора (с учетом центробежной

силы ударника, возникающей при вращении системы) выглядит следующим образом:

$$2 \cdot \ddot{x} = \omega^2 \cdot (r - R + 2 \cdot x) + 2 \cdot g \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) - 2 \cdot f_1 \cdot g \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t). \quad (3.43)$$

Данное уравнение является линейным неоднородным дифференциальным уравнением 2-го порядка с постоянными коэффициентами. Стандартная процедура решения такого типа дифференциальных уравнений принимает вид:

$$x(t) = C_1 \cdot e^{-\omega t} + C_2 \cdot e^{\omega t}. \quad (3.44)$$

Используя метод вариации произвольной постоянной, считая, что  $C_1$  и  $C_2$  функции от  $t$ , общее решение принимает следующую форму:

$$x(t) = C_1(t) \cdot e^{-\omega t} + C_2(t) \cdot e^{\omega t}, \quad (3.45)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  находятся из системы уравнений:

$$\begin{cases} x_1(t) \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) + x_2(t) \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) = 0, \\ \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) \cdot \frac{d}{dt} \cdot y_1(t) + \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) \cdot \frac{d}{dt} \cdot y_2(t) = f(t). \end{cases} \quad (3.46)$$

где  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  — линейно независимые частные решения линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка, представленные в экспоненциальном виде:

$$x_1(t) = e^{-\omega t} \text{ при } C_1 = 1 \text{ и } C_2 = 0; \quad (3.47)$$

$$x_2(t) = e^{\omega t} \text{ при } C_1 = 0 \text{ и } C_2 = 1. \quad (3.48)$$

В этом случае:

$$f(t) = \frac{\omega^2 \cdot (r - R)}{2} - g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + g \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t). \quad (3.49)$$

Учитывая вышесказанное, система (3.46) принимает вид:

$$\begin{cases} e^{\omega t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) + e^{-\omega t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) = 0, \\ \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot e^{-\omega t} + \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot e^{\omega t} = \\ = \frac{\omega^2 \cdot (r - R)}{2} - g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + g \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t). \end{cases} \quad (3.50)$$

Или:

$$\begin{cases} e^{\omega t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) + e^{-\omega t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) = 0, \\ \omega \cdot e^{\omega t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) - \omega \cdot e^{-\omega t} \cdot \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) = \\ = \frac{\omega^2 \cdot (r - R)}{2} - g \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + g \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t). \end{cases} \quad (3.51)$$

В этом случае система принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \cdot C_1(t) = \frac{e^{\omega t} \left( \omega^2 \cdot (R - r) + 2 \cdot g \cdot (f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) - \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t)) \right)}{4 \cdot \omega}, \\ \frac{d}{dt} \cdot C_2(t) = \frac{e^{-\omega t} \left( \omega^2 \cdot (r - R) - 2 \cdot g \cdot (f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) - \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t)) \right)}{4 \cdot \omega}. \end{cases} \quad (3.52)$$

Решение дифференциальных уравнений системы (3.52) в общем виде выглядит как:

$$C_1(t) = C_3 + \int \frac{e^{\omega t} \left( \omega^2 \cdot (R-r) + 2 \cdot g \cdot (f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) - \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t)) \right)}{4 \cdot \omega} dt, \quad (3.53)$$

$$C_2(t) = C_4 + \int \frac{e^{-\omega t} \left( \omega^2 (r-R) - 2 \cdot g \cdot (f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) - \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t)) \right)}{4 \cdot \omega} dt. \quad (3.54)$$

После стандартной процедуры интегрирования выражения принимают вид:

$$C_1(t) = C_3 + \frac{e^{\omega t} \left[ (R-r) - \frac{g}{\omega^2} (\sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (f_1 - 1) + \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (1 + f_1)) \right]}{4}; \quad (3.55)$$

$$C_2(t) = C_4 + \frac{e^{-\omega t} \left[ (R-r) - \frac{g}{\omega^2} (\sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (f_1 + 1) + \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (f_1 - 1)) \right]}{4}. \quad (3.56)$$

В итоге:

$$x(t) = C_3 \cdot e^{-\omega t} + C_4 \cdot e^{\omega t} + \frac{R-r}{2} + \frac{g \cdot (f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) - \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t))}{2 \cdot \omega^2}. \quad (3.57)$$

Постоянные  $C_3$  и  $C_4$  определяем из начальных условий движения ударника:

$$t=0: x(0) = 0, \dot{x}(0) = 0, \quad (3.58)$$

$$C_3 = -\frac{\omega^2 \cdot (R - r) + g \cdot (\cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (1 + f_1) - \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (1 - f_1))}{4 \cdot \omega^2}; \quad (3.59)$$

$$C_4 = \frac{\omega^2 \cdot (r - R) + g \cdot (\cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (1 - f_1) + \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) \cdot (f_1 + 1))}{4 \cdot \omega^2}. \quad (3.60)$$

В итоге, после подстановки постоянных  $C_3$  и  $C_4$ , выражение (3.57) принимает следующий вид:

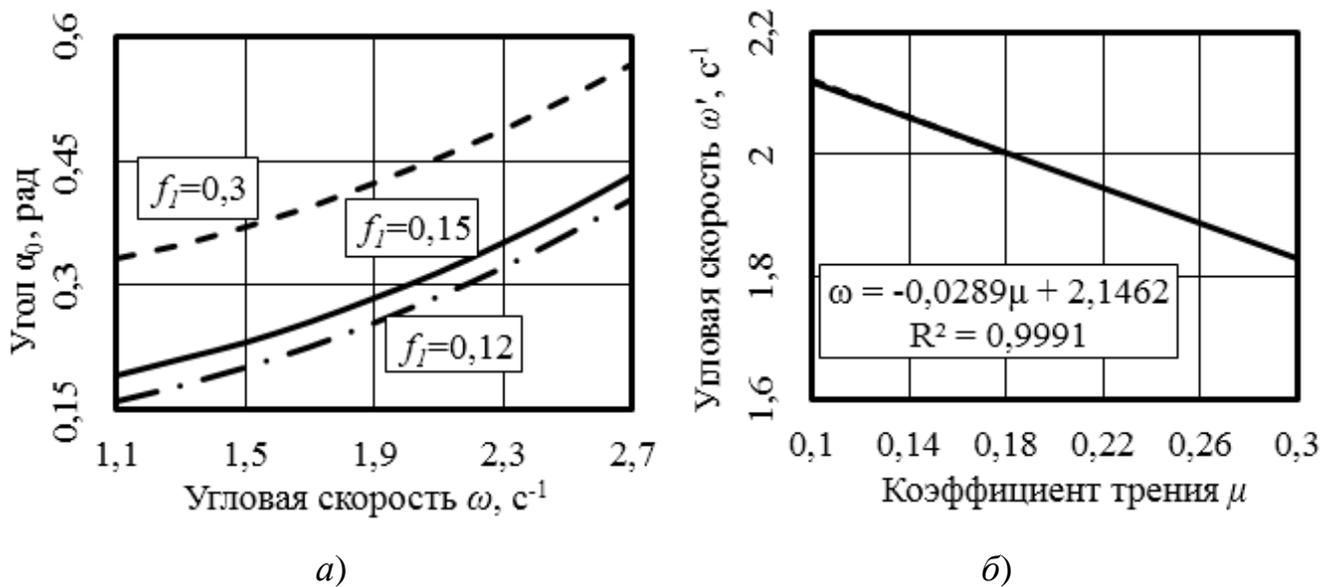
$$\begin{aligned} x(t) = & \frac{R - r}{2} - \frac{g \cdot (\sin(\alpha_0 + \omega \cdot t) - f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \omega \cdot t))}{2 \cdot \omega^2} + \\ & + \frac{e^{\omega t} \left[ \omega^2 \cdot (r - R) + g \cdot (\cos(\alpha_0)(1 - f_1) + \sin(\alpha_0)(1 + f_1)) \right]}{4 \cdot \omega^2} - \\ & - \frac{e^{-\omega t} \left[ \omega^2 \cdot (R - r) + g \cdot (\cos(\alpha_0)(1 + f_1) - \sin(\alpha_0)(1 - f_1)) \right]}{4 \cdot \omega^2}. \end{aligned} \quad (3.61)$$

Решение данных дифференциальных уравнений численными методами позволяет описать закономерности движения ударника по направляющим в зависимости от угловой скорости вращения ротора  $\omega$  и различных коэффициентов трения при сочетании фрикционных пар материалов рабочих органов (ударника и направляющих): сталь по бронзе  $f_1 = 0,12$ , сталь по стали  $f_1 = 0,15$ , сталь по чугуну  $f_1 = 0,3$ . При проведении математических расчетов основных параметров роторно-ударного измельчителя использовались следующие его конструктивные и технико-эксплуатационные характеристики: угловая скорость вращения ротора принималась в диапазоне  $1,1 \dots 2,7 \text{ с}^{-1}$ ; рабочие радиусы вращения мелющих тел в их верхнем и нижнем положениях относительно центра вращения ротора  $R = 1,05 \text{ м}$  и  $r = 0,3 \text{ м}$  соответственно.

В зависимости от расстояния, преодолеваемого ударником от его верхнего до нижнего положения относительно центра вращения ротора, и геометрических размеров ротора измельчителя при решении численными методами определяется

необходимая угловая скорость вращения ротора для обеспечения ударного контакта в требуемом секторе рабочей поверхности корпуса измельчителя  $\omega'$ .

В первую очередь для этого необходимо найти угол положения ротора, при котором начинается движение штока ударного элемента измельчителя относительно направляющих ротора  $\alpha_0$ , и угловую скорость вращения самого ротора, требуемую для обеспечения ударного контакта мелющего тела со слоем дроби в секторе А корпуса измельчителя (см. рисунок 3.12) при определенном коэффициенте трения материалов штока и направляющих, графические зависимости которых представлены на рисунке 3.13.



а — зависимости угла  $\alpha_0$  от угловой скорости; б — зависимость необходимой угловой скорости  $\omega'$  от коэффициента трения

Рисунок 3.13 — Зависимости угла положения ротора  $\alpha_0$  от угловой скорости вращения и требуемой угловой скорости вращения ротора от коэффициента трения

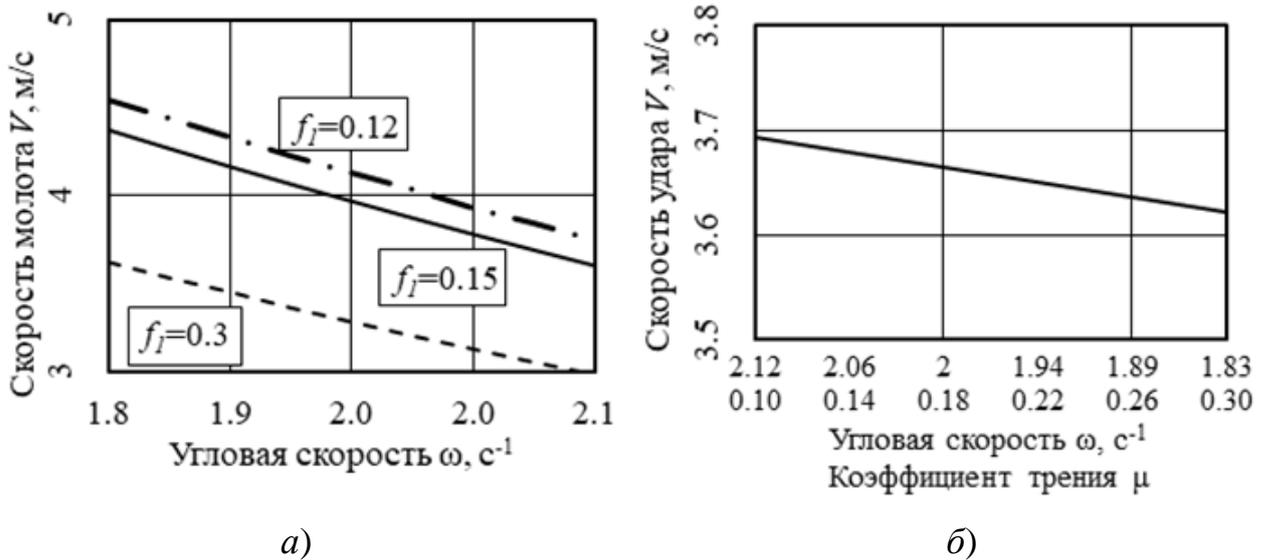
Скорость поступательного движения ударного элемента подчиняется следующей зависимости от времени:

$$V = \dot{x}(t) = C_4 \cdot \omega \cdot e^{\omega t} - C_3 \cdot \omega \cdot e^{-\omega t} - \frac{g \cdot (\cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + f_1 \cdot \sin(\alpha_0 + \omega \cdot t))}{2 \cdot \omega}. \quad (3.62)$$

Подставив постоянные  $C_3$  и  $C_4$ , зависимость для определения скорости ударника относительно подвижной координатной оси  $x$  от времени принимает следующий вид:

$$V(t) = -\frac{g \cdot (\cos(\alpha_0 + \omega \cdot t) + \sin(\alpha_0 - \omega \cdot t) \cdot f_1)}{2 \cdot \omega} + \frac{e^{\omega t} \left[ \omega^2 \cdot (r - R) + g \cdot (\cos(\alpha_0) \cdot (1 - f_1) + \sin(\alpha_0)(1 + f_1)) \right]}{4 \cdot \omega} - \frac{e^{-\omega t} \left[ \omega^2 \cdot (R - r) - g \cdot (\cos(\alpha_0) \cdot (1 + f_1) - \sin(\alpha_0)(1 - f_1)) \right]}{4 \cdot \omega}. \quad (3.63)$$

На рисунке 3.14 отображены графики зависимости линейных скоростей, при которых происходит ударное взаимодействие мелющего тела с частицами дроби в зоне контакта ударного измельчителя, от угловой скорости вращения ротора при различных коэффициентах трения штока и направляющих (см. рисунок 3.14, *а*) и графическая зависимость, отображающая функцию линейной скорости ударного воздействия (сектор А) (см. рисунок 3.14, *б*) от угловой скорости и коэффициента трения, сочетание которых гарантирует условие ударного контакта в требуемом секторе внутренней поверхности корпуса измельчителя.



- а) — зависимости скорости ударника от угловой скорости ротора;  
 б) — зависимость скорости ударника в зоне контакта с дробью от угловой скорости и коэффициента трения

Рисунок 3.14 — Графические зависимости скорости ударного контакта мелющего тела с дробью

Из анализа графиков, представленных на рисунке 3.14, видно, что коэффициент трения пар материалов существенно влияет на угол положения ротора, при котором начинается относительное движение ударника по направляющим. При увеличении угла  $\alpha_0$  во время вращения ротора сокращается время, необходимое для обеспечения перемещения ударника в необходимый сектор ударного контакта, что требует уменьшения скорости вращения ротора, приводящего к снижению массовой производительности измельчителя. При этом исследования показали, что сопоставление требуемых значений коэффициентов трения материалов штока и направляющих, а также угловых скоростей вращения ротора, обеспечивающих условие удара мелющего тела по дробе в необходимом секторе корпуса, фактически не сказывается на линейной скорости ударного взаимодействия мелющего тела и дроби.

### 3.6.2 Разработка метода обоснования энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя

Для определения мощности двигателя в первую очередь необходимо определить крутящий момент на валу ротора роторно-ударного измельчителя, требуемый для обеспечения его вращательного движения.

Величина крутящего момента, создаваемого электродвигателем привода, будет зависеть от двух основных величин: момента, необходимого для преодоления сил трения ударных элементов со скребком для выгрузки готового материала, сил тяжести ударников и момента, возникающего от сил трения в подшипниковых опорах:

$$M_{кр} = M_p + M_{тр.н.}, \quad (3.64)$$

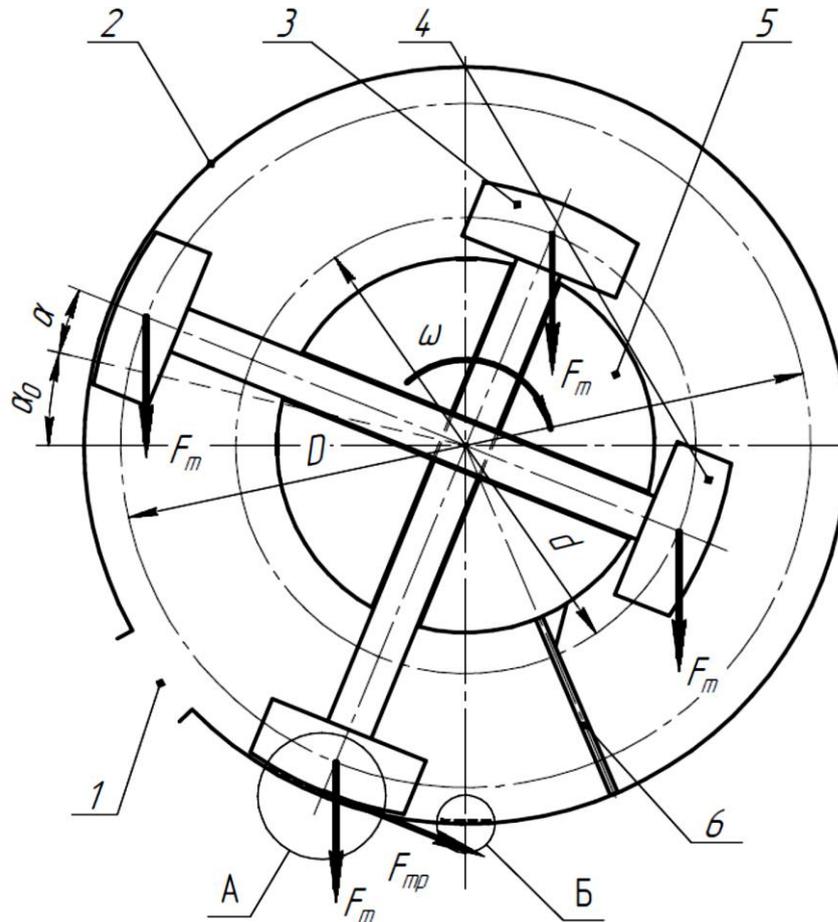
где  $M_p$  — суммарный момент от сил трения ударников и скребка о дробленый материал и по внутренней рабочей поверхности рабочей камеры и сил тяжести ударных элементов, Н·м;

$M_{тр.н.}$  — момент от сил трения в подшипниковых опорах ротора измельчителя, Н·м.

#### 3.6.2.1 Динамическая модель роторно-ударного измельчителя в процессе измельчения материалов

Для определения необходимого крутящего момента, создаваемого двигателем для обеспечения вращательного движения ротора и процесса выдачи дробы необходимо рассмотреть процесс раскалывания на этапе, при котором ударник 3 после завершения контактного соударения при вращении ротора взаимодействует с массивом расколотой дробы и увлекает за собой определенное количество дробин, перемещая их по поверхности корпуса 2 к разгрузочному отверстию 1. При этом часть измельченного материала скатывается под действием силы тяже-

сти в нижний сектор рабочей поверхности рабочей камеры и в дальнейшем захватывается скребком, а затем также выгружается через разгрузочное отверстие измельчителя (см. рисунок 3.15).



- 1 — разгрузочное отверстие; 2 — рабочая поверхность корпуса;  
 3 — мелющее тело в нижнем положении; 4 — мелющее тело в верхнем  
 положении; 5 — ротор; 6 — скребок  
 А — зона взаимодействия ударника с материалом при движении к выгрузному  
 отверстию; Б — зона ударного контакта ударника с материалом

Рисунок 3.15 — Расчетная схема для определения крутящего момента на валу роторно-ударного измельчителя

На вал ротора при его вращательном движении и вращательно-поступательном движении ударных элементов действуют следующие силы и моменты сил: сила трения  $F_{тр}$ , возникающая при взаимодействии рабочей поверх-

ности одного из ударников со слоем дробимого материала в зоне контакта с корпусом ударного измельчителя, вращающий момент, передаваемый от электродвигателя  $M_p$ , приложенный к валу ротора, а также силы тяжести мелющих тел  $F_m$ .

Для этих условий необходимо определить закономерность, по которой изменяется крутящий момент  $M_p$ , обеспечивающий вращательное движение ротора измельчителя в комплексе с ударниками при условии постоянства частоты его вращения.

Для определения закономерности, по которой изменяется крутящий момент на валу ротора, используется уравнение Лагранжа второго рода [117, 118]. В качестве обобщенной координаты принимаем угол поворота  $\alpha$  одного из ударных элементов ротора относительно горизонтальной оси координат  $x$  (см. рисунок 3.15).

Уравнение Лагранжа второго рода для условий взаимодействия рабочих органов ударного измельчителя:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha, \quad (3.65)$$

Чтобы найти обобщенные силы  $Q$ , соответствующие обобщенной координате, системе сообщается возможное перемещение, т.е. задается приращение углу поворота ротора  $\alpha$ .

В сумму элементарных работ, задаваемых моментами сопротивления на возможном перемещении  $\delta\alpha$  входят работа крутящего момента от электродвигателя  $M_p$ , работа момента силы трения при взаимодействии ударника со скребком с материалом на поверхности корпуса  $M_{mp}$  и работа момента от силы тяжести ударников  $M_m$ :

$$\delta A_\alpha = Q_\alpha \cdot \delta\alpha = (M_p + M_{mp} + M_m) \cdot \delta\alpha, \quad (3.66)$$

Если предположить, что одновременно с выгрузкой порции расколотого ударником материала происходит взаимодействие скребка с оставшейся дробью в нижней части корпуса, то действие силы трения при контакте с материалом продолжается на всем участке движения ударника от нижнего положения до угла  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ .

При определении максимального и текущих значений момента сопротивления при измельчении дроби необходимо рассматривать движение ударника и ротора на двух участках рабочей поверхности корпуса (относительно центра вращения ротора) (см. рисунок 3.15):

- 1) при движении в секторе от 0 до  $\alpha_0$ ;
- 2) при движении в секторе  $\alpha_0$  до  $\frac{\pi}{2}$ .

Для обоих случаев момент от силы трения мелющего тела по слою дроби определяется как:

$$M_{mp} = F_{mp} \cdot R = m_m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot R \cdot f_2. \quad (3.67)$$

Моменты от сил тяжести определяются следующим образом.

Для первого ударного элемента:

$$M_{m1} = -F_m \cdot (R - r) \cdot \cos \alpha = -m_m \cdot g \cdot (R - r) \cdot \cos \alpha. \quad (3.68)$$

Для второго ударного элемента необходимо рассматривать движение системы при углах поворота ротора  $\alpha \leq \alpha_0$  и  $\alpha \geq \alpha_0$ . В этом случае плечи сил тяжести будут изменяться в зависимости от расстояния, пройденного ударным элементом по направляющим относительно оси вращения ротора.

Момент сопротивления от сил тяжести ударников находится по следующему выражению:

$$M_{m2} = F_m \cdot (r - R + 2 \cdot x(t)) \cdot \sin \alpha = m_m \cdot g \cdot (r - R + 2 \cdot x(t)) \cdot \sin \alpha. \quad (3.69)$$

С учетом того, что угол поворота ротора  $\omega \cdot t = \alpha$ , выражение (3.61) принимает вид:

$$\begin{aligned} x(\alpha) = & \frac{R-r}{2} - \frac{g \cdot (\sin(\alpha_0 + \alpha) - f_1 \cdot \cos(\alpha_0 + \alpha))}{2 \cdot \omega^2} + \\ & + \frac{e^\alpha \cdot [\omega^2 \cdot (r-R) + g \cdot (\cos(\alpha_0) \cdot (1-f_1) + \sin(\alpha_0) \cdot (1+f_1))]}{4 \cdot \omega^2} - \\ & - \frac{e^{-\alpha} \cdot [\omega^2 \cdot (R-r) + g \cdot (\cos(\alpha_0) \cdot (1+f_1) - \sin(\alpha_0) \cdot (1-f_1))]}{4 \cdot \omega^2}. \end{aligned} \quad (3.70)$$

При этом формула (3.69) принимает следующий вид:

$$M_m = F_m (r - R + 2x(\alpha)) \cos \alpha = m_m g (r - R + 2x(\alpha)) \cos \alpha. \quad (3.71)$$

Тогда сумма элементарных работ задаваемых сил и моментов на возможном угловом перемещении ротора и мелющих тел  $\delta\alpha$  при их совместном вращательном движении на двух участках рабочей поверхности корпуса измельчителя будет определяться как:

$$\begin{aligned} \delta A_\alpha = & M_p + m_m \cdot g \times \\ & \times [(r-R) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha] \cdot \delta\alpha, \text{ если } \alpha \leq \alpha_0; \\ & \delta A_\alpha = M_p + m_m \cdot g \times \\ & \times [(r-R+2 \cdot x(\alpha)) \cdot \cos \alpha - (R-r) \cdot \sin \alpha - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha] \delta\alpha, \text{ если } \alpha \geq \alpha_0. \end{aligned} \quad (3.72)$$

Обобщенная сила:

$$\begin{aligned}
 Q_\alpha &= M_p + m_m \cdot g \times \\
 &\times \left[ (r - R) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha \right], \text{ если } \alpha \leq \alpha_0; \\
 & \\
 Q_\alpha &= M_p + m_m \cdot g \times \\
 &\times \left[ (r - R + 2 \cdot x(\alpha)) \cdot \cos \alpha - (R - r) \cdot \sin \alpha - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha \right], \text{ если } \alpha \geq \alpha_0.
 \end{aligned}
 \tag{3.73}$$

Кинетическая энергия системы:

$$T = J_y \cdot \omega^2 + J_y \cdot \omega^2 = m_m \cdot \omega^2 \cdot (R^2 + r^2), \tag{3.74}$$

где  $J_y$  — момент инерции ударного элемента относительно центра вращения ротора, Н·м<sup>2</sup>.

Частная производная кинетической энергии системы по обобщенной координате  $\alpha$  с учетом того, что  $\omega = \dot{\alpha}$ :

$$\frac{\delta T}{\delta \alpha} = 0. \tag{3.75}$$

Первая частная производная зависимости кинетической энергии системы ротор-шток-ударник по обобщенной угловой скорости вращательного движения ротора измельчителя  $\dot{\alpha}$ :

$$\frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}} = 2 \cdot m_m \cdot \dot{\alpha} \cdot (R^2 + r^2). \tag{3.76}$$

Производная кинетической энергии по времени от частной производной вычисляется по скорости:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{\alpha}} \right) = 2 \cdot m_m \cdot \ddot{\alpha} \cdot (R^2 + r^2). \quad (3.77)$$

Используя ранее полученные выражения, а также выражение обобщенных сил, уравнение Лагранжа второго рода получает окончательный вид:

$$2 \cdot m_m \cdot \ddot{\alpha} \cdot (R^2 + r^2) = M_p + m_m \cdot g \times \\ \times \left[ (r - R) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha \right], \text{ если } \alpha \leq \alpha_0; \quad (3.78)$$

$$2 \cdot m_m \cdot \ddot{\alpha} \cdot (R^2 + r^2) = M_p + m_m \cdot g \times \\ \times \left[ (r - R + 2 \cdot x(\alpha)) \cdot \cos \alpha - (R - r) \cdot \sin \alpha - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha \right], \text{ если } \alpha \geq \alpha_0.$$

Принимая во внимание то, что угловая скорость вращательного движения ротора  $\omega = \dot{\alpha} = const$  а, следовательно, угловое ускорение при вращении  $\ddot{\alpha} = 0$ , зависимость (3.78) для определения требуемого крутящего момента примет следующий вид:

$$M_p = -m_m \cdot g \times \\ \times \left[ (r - R) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha) - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha \right], \text{ если } \alpha \leq \alpha_0; \quad (3.79)$$

$$M_p = -m_m \cdot g \times \\ \times \left[ (r - R + 2 \cdot x(\alpha)) \cdot \cos \alpha - (R - r) \cdot \sin \alpha - 2 \cdot R \cdot f_2 \cdot \cos \alpha \right], \text{ если } \alpha \geq \alpha_0.$$

Графическое отображение зависимости требуемого крутящего момента от углового положения ротора в процессе раскалывания стальной дроби представлено на рисунке 3.16.

На основании анализа графической зависимости численными методами можно определить наибольший крутящий момент, необходимый для обеспечения вращательного движения ротора.

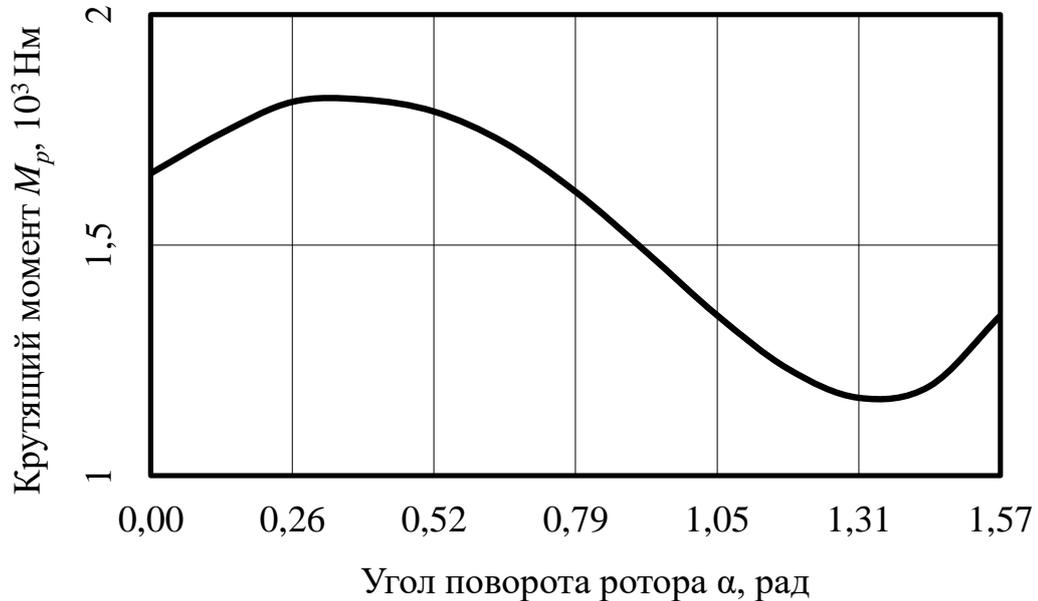


Рисунок 3.16 — График зависимости крутящего момента от сил трения о материал и сил тяжести мелющих тел от угла положения ротора

### 3.6.2.2 Метод определения момента трения в подшипниковых опорах ротора

Для ударных роторных дробилок и мельниц (с подвижными и неподвижными ударными органами), на основании опыта их производственной эксплуатации в качестве опор валов роторов рекомендуется использовать радиальные двухрядные роликовые сферические самоустанавливающиеся подшипники типа 3000 (серия ширин – 0) [119, 120].

Для определения момента трения в опорах ротора используем методику, предложенную компанией SKF для данного типа подшипников [121].

По расчетной модели момент трения в подшипниках выражается следующим уравнением:

$$M_{mp.n.} = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.80)$$

где  $M_{rr}$  — момент трения качения, Н·м;

$M_{sl}$  — момент трения скольжения, Н·м;

$M_{seal}$  — момент от сил трения в уплотнениях, Н·м;

$M_{drag}$  — момент трения в подшипниках, возникающий за счет сопротивления, взбалтывания, разбрызгивания смазочного материала и т.д., Н·м.

Момент от сил трения качения в подшипниковых опорах определяется следующим эмпирическим выражением:

$$M_{rr} = G_{rr} \cdot (\nu \cdot n_p)^{0,6}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.81)$$

где  $n_p$  — частота вращения, об/мин;

$\nu$  — кинематическая вязкость смазочного материала при рабочей температуре (для пластичной смазки величина вязкости базового масла), мм<sup>2</sup>/с;

$G_{rr}$  — переменная трения качения, зависящая от типа подшипника, его среднего диаметра, радиальной нагрузки  $F_r$ , осевой нагрузки  $F_a$  и определяемая по следующим формулам, Н·м:

$$G_{rr.e} = Y_1 \cdot d_n^{1,85} (F_r + Y_2 \cdot F_a)^{0,54}; \quad (3.82)$$

$$G_{rr.l} = Y_3 \cdot d_n^{2,3} \cdot (F_r + Y_4 \cdot F_a)^{0,31}. \quad (3.83)$$

где  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  — геометрические константы моментов трения качения сферических роликоподшипников;

$d_n$  — средний диаметр подшипника, мм:

$$d_n = 0,5(D_n + d_g), \quad (3.84)$$

где  $D_n$  — наружный диаметр подшипника, мм;

$d_e$  — диаметр посадочного места подшипника, мм.

При  $G_{rr.e} \leq G_{rr.l}$  переменная  $G_{rr} = G_{rr.e}$ , в случае если  $G_{rr.e} \geq G_{rr.l}$ , то  $G_{rr} = G_{rr.l}$ .

Момент трения скольжения в подшипниках определяется по следующей зависимости:

$$M_{sl} = G_{sl} \cdot \mu_{sl}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.85)$$

где  $\mu_{sl}$  — коэффициент трения скольжения, в условиях образования полноценной смазочной пленки [121];

$G_{sl}$  — переменная трения скольжения, зависящая от типа подшипника, среднего диаметра подшипника  $d_n$ , радиальной нагрузки  $F_r$ , осевой нагрузки  $F_a$  и определяемая по следующим формулам, Н·м:

$$G_{sl.e} = S_1 \cdot d_n^{0,25} \left( F_r^4 + S_2 \cdot F_a^4 \right)^{\frac{1}{3}}; \quad (3.86)$$

$$G_{sl.l} = S_3 \cdot d_n^{0,94} \left( F_r^3 + S_4 \cdot F_a^3 \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (3.87)$$

При  $G_{sl.e} \leq G_{sl.l}$  переменная  $G_{rsl} = G_{sl.e}$ , в случае если  $G_{sl.e} \geq G_{sl.l}$ , то  $G_{sl} = G_{sl.l}$ .

$S_1, S_2, S_3, S_4$  — геометрические константы моментов трения скольжения сферических роликоподшипников.

Момент трения уплотнений подшипников с уплотнениями на обеих сторонах можно приблизительно рассчитать при помощи следующего эмпирического уравнения:

$$M_{seal} = K_{s1} \cdot d_s^\beta + K_{s2}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.88)$$

где  $K_{s1}$  — константа, зависящая от типа подшипника;

$d_s$  — диаметр сопротивления поверхности уплотнения, мм;

$\beta$  — показатель, зависящий от типа подшипника и уплотнения;

$K_{s2}$  — константа, зависящая от типа подшипника и уплотнения.

Потери на сопротивление и перемешивание («барботаж») смазочного материала в подшипниковой опоре ротора выражаются одной компонентой потерь:

$$M_{drag} = 10 \cdot V_M \cdot K_{roll} \cdot B \cdot d_n^4 \cdot n_p^2, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.89)$$

где  $V_M$  — переменная как функция, зависящая от высоты уровня смазочного материала и среднего диаметра подшипника [121];

$K_{roll}$  — константа для роликоподшипников, определяется по эмпирической формуле:

$$K_{roll} = \frac{K_L \cdot K_Z \cdot (D_n + d_e)}{D_n - d_e} \cdot 10^{-12}, \quad (3.90)$$

где  $K_L$ ,  $K_Z$  — константы, зависящие от типа подшипника;

$B$  — ширина внутреннего кольца подшипника, мм.

### 3.6.2.3 Метод определения мощности двигателя роторного-ударного измельчителя

Рассчитав крутящий момент можно определить мощность двигателя для привода измельчителя.

На основании аналитической зависимости (3.64) мощность электродвигателя привода роторно-ударного измельчителя находится по следующей зависимости:

$$W_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{кр}} \cdot \omega}{\eta_{\text{пр}}}, \quad (3.91)$$

где  $\eta_{\text{пр}}$  — коэффициент полезного действия привода [122].

Графическое отображение зависимости требуемой мощности привода двигателя роторно-ударного измельчителя от углового положения ротора в процессе раскалывания стальной дроби представлено на рисунке 3.17.

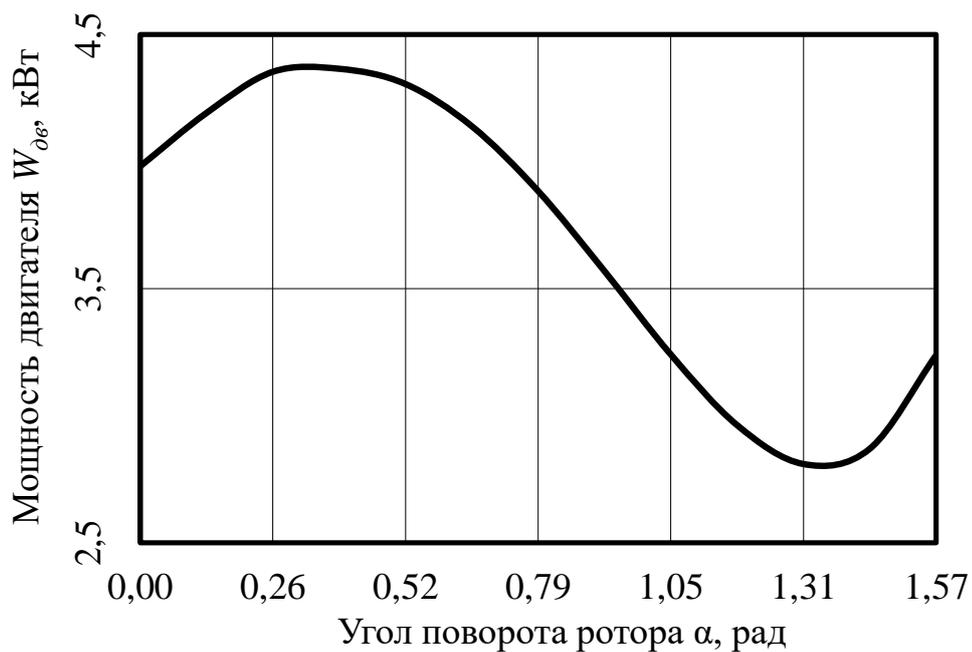


Рисунок 3.17 — График зависимости мощности, затрачиваемой на вращение ротора измельчителя от угла его положения

Таким образом, мощность электродвигателя роторно-ударного измельчителя можно определить как ее максимальное значение, взятое из графика, умножен-

ное на коэффициент запаса  $k_{\text{мощ}}$  (перегрузочная способность, обычно принимают 1,1...1,3 [123]).

При этом установлено, что в диапазоне углов поворота ротора роторно-ударного измельчителя от 0 до  $\pi$ , момент сопротивления и требуемая мощность привода дробильной машины 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  $\alpha_0$ .

В связи с тем, что вышеприведенные расчеты были выполнены для однорядного компоновочного решения роторно-ударного измельчителя, то окончательно расчет мощности осуществляется по формуле:

$$W_{\text{дв}} = \frac{k_{\text{мощ}} \cdot M_{\text{кр}} \cdot \omega \cdot q_p}{\eta_{\text{пр}}}, \text{ Вт} \quad (3.92)$$

где  $q_p$  — коэффициент рядности конструктивного исполнения измельчителя.

Таким образом, при многорядном наложении раскалывающих усилий ориентировочная мощность электродвигателя роторно-ударного измельчителя подчиняется закономерности, показанной на рисунке 3.17.

При четырехрядном исполнении измельчителя и параметрах  $k_{\text{мощ}}=1,5$  согласно (3.92) и рисунку 3.17 мощность двигателя составит около 17,2 кВт.

### **3.7 Математическое моделирование выгрузки готового продукта из измельчителя**

В качестве одного из технических решений реализации выгрузки готового продукта из рабочей камеры роторно-ударного измельчителя может быть преду-

смотрено установка разгрузочного скребка, закрепленного на вращающемся роторе, который может быть выполнен из упругого материала (например, резины или листовой пластины). При вращении ротора скребок захватывает продукты разрушения стальной дроби, продвигает их к месту разгрузочного отверстия, где они свободно просыпаются вниз из рабочей камеры под действием силы тяжести в специальную емкость, установленную под измельчителем или транспортируются далее на рассев конвейерным транспортом.

При этом линейная скорость на конце лопасти скребка определяется по формуле:

$$V_c = \omega \cdot R_c, \text{ м/с} \quad (3.93)$$

где  $R_c$  — расстояние от оси вращения ротора до внутренней поверхности рабочей камеры измельчителя, м.

При попадании в разгрузочное отверстие измельчителя частицы свободно просыпаются вниз под действием очень малых гравитационных сил по сравнению с силами ударного взаимодействия, что уже не может вызвать их дальнейшего разрушения. Таким образом, полученную остроугольную стальную дробь можно считать стабилизированной по фракционному состоянию, при этом ввиду малости указанных сил ими можно пренебречь, так как они относятся к значительному порядку малости.

Действительно, если потенциальная энергия ударного нагружения частицы дроби составляет:

$$E_m = m_m \cdot g \cdot H_m, \quad (3.94)$$

а потенциальная энергия падающей расколотой частицы остроугольной дроби:

$$E_q = m_q \cdot g \cdot H_q, \quad (3.95)$$

из этого следует, что:

$$E_m \gg E_q. \quad (3.96)$$

Если масса падающего мелющего тела роторно-ударного измельчителя составляет 240 кг, а частицы колотой дроби порядка 0,01...0,001 кг, то на нее действует энергия в 24000...240000 раз меньшая, что не может вызвать дальнейшего разрушения.

В связи с этим более подробное изучение поведения подсистемы  $S_{3,i}$ , согласно структурной схеме (см. рисунок 3.6) лишено смысла.

### **3.8 Рекомендации по выбору конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя для условий процесса дробления стальной сферической дроби в условиях ООО «Завод стальной дроби»**

Полученные результаты математического моделирования процесса разрушения сферических тел стесненным ударом, взаимодействия и движения рабочих органов ударного роторного измельчителя, предназначенного для производства сферической стальной дроби в условиях ООО «Завод стальной дроби», в виде рекомендуемых для нее конструктивно-технологических, энергосиловых и эксплуатационных параметров при использовании стальных штоков ударников и направляющих ротора, изготовленных из различных материалов, представлены в таблице 3.2 и рекомендованы для внедрения в производство (см. приложение А).

Таблица 3.2 — Рекомендуемые конструктивно-технологические параметры роторно-ударного измельчителя

№ п/п	Параметр	Материал направляющих		
		Бронза	Сталь	Чугун
1	Коэффициент трения ударника по направляющим	0,12	0,15	0,3
2	Радиус внешнего положения ударника, м	1,05		
3	Радиус внутреннего положения ударника, м	0,3		
4	Угловое положение ротора при начале относительного движения ударника $\alpha_0$ , рад	0,25	0,28	0,42
5	Угловая скорость вращения ротора, $c^{-1}$	2,1	2,0	1,83
6	Расчетная скорость ударного контакта, м/с	3,7	3,67	3,62
7	Количество ударников, шт.	4		
8	Предполагаемая производительность измельчителя, т/ч	1,05	1	0,9
9	Мощность электродвигателя привода, кВт	17,2		

### Выводы к разделу 3

1. Проведено моделирование процесса ударного нагружения сфероидного тела конечно-элементным методом, с помощью которого установлено, что обеспечить разрушение стальной дроби 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.

2. Моделирование стесненного центрального удара «молотом» по стальной дроби на «наковальне», используя метод конечных элементов, в программном

комплексе ANSYS Workbench верифицировало предположение о целесообразности использования данного способа разрушения материалов и разработки роторно-ударного измельчителя, в основу которого заложен предложенный способ разрушения материалов прямым стесненным ударом.

3. Проведен системный анализ роторно-ударного измельчителя, позволяющий представить процесс измельчения дробы в дробильной машине как совокупность трех отдельных элементов технологического процесса: подачи дробы в рабочую камеру измельчителя; обеспечения процесса раскалывания путем падения мелющих тел на слой дробы, располагающейся в зоне действия удара на футеровке; удаления готового продукта из рабочей зоны.

4. На основе усовершенствованной модели Герца об упругом контакте простых поверхностей разработана математическая модель стесненного ударного контакта сфероидного тела с дробящими поверхностями, на основании чего предложена зависимость для определения максимального количества дробинки, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации прямого одиночного стесненного удара мелющего тела с определенной скоростью и массой. Установлено, что скорость ударного контакта влияет на количество раскалываемой части дробы в степенной зависимости с показателем больше единицы, а масса – в степенной зависимости с положительным показателем меньше единицы, что говорит о том, что скорость удара оказывает более существенное воздействие на эффективность раскалывания дробы по сравнению с влиянием массы ударного элемента. Предложены графические зависимости количества дробинки диаметром 3 мм (в диапазоне 5...35 тыс. шт.), при котором обеспечивается их раскалывание от массы ударника в пределах от 50 до 200 кг и от скорости ударного контакта в диапазоне от 1,0 до 3,0 м/с.

5. Рассмотрена типовая методика расчета шлюзового питателя для подачи сферической стальной дробы в роторно-ударный измельчитель, которая показывает, что для стабильного обеспечения его работоспособности при номинальной производительности 1,0 т/ч требуется мощность привода питателя составляет около 2,0 кВт.

6. На основании дифференциального закона механического движения разработана зависимость угла положения вала ротора роторно-ударного измельчителя, при котором начинается движение штока ударника по направляющим при его вращении относительно горизонтального положения от внешнего и внутреннего радиусов вращения ударников в их верхнем и нижнем положениях, от угловой скорости вращения вала ротора и коэффициента трения материалов направляющих ротора и штока ударника, позволяющая обосновать необходимую скорость вращения исполнительного органа измельчителя для обеспечения ударного контакта мелющего тела со слоем дроби в нижнем секторе корпуса. Установлено, что в диапазоне коэффициентов трения пары материалов ударника и направляющих  $0,12 \dots 0,3$  угловая скорость вращения вала ротора для обеспечения ударного контакта в нижнем секторе корпуса измельчителя может отличаться в 1,15 раза.

7. Сопоставление результатов математического моделирования указывает на то, что коэффициент трения материалов штока и направляющих, а также угловых скоростей вращения ротора, обеспечивающие условие удара в необходимом секторе рабочей камеры, фактически не влияют на линейную скорость ударного взаимодействия ударника и дроби.

8. Используя дифференциальное уравнение движения механической системы (уравнение Лагранжа II-ого рода) разработан метод обоснования энергосиловых параметров роторно-ударного измельчителя, на основании которого предложена зависимость момента сопротивления на валу ротора от радиусов вращения ударников в их верхнем и нижнем положениях, угловой скорости вращения ротора и коэффициента трения материалов направляющих ротора и штока ударника, позволяющая обосновать значение требуемой мощности привода дробильно-измельчительной машины в процессе измельчения стальной сферической дроби.

9. Установлено, что в диапазоне углов поворота ротора роторно-ударного измельчителя от  $0$  до  $\pi$ , момент сопротивления и требуемая мощность привода дробильной машины 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.

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

## РАЗДЕЛ 4

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА  
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ДРОБИ СТЕСНЕННЫМ  
УДАРОМ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-УДАРНОГО  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ**

**4.1 Экспериментальное исследование процесса раскалывания единичной  
частицы дробы прямым стесненным ударом**

При проведении экспериментальных исследований получены основные энергетические показатели процесса раскалывания единичной частицы дробы различного диаметра прямым стесненным ударом, эмпирические значения и расчетные данные которых представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Экспериментальные и расчетные энергетические показатели  
раскалывания дробы прямым стесненным ударом

№ п/п	Диаметр дробинки, $d$ , мм	Масса груза $m$ , кг	Среднее значение высоты сбрасывания груза $h_{cp}$ , м	Энергия удара, $E$ , Дж	Объем дробинки $V$ , мм <sup>3</sup>	Удельные энергозатраты $e_v$ , Дж/мм <sup>3</sup>
1	1,8	0,93	0,033	0,30	3,05	0,10
2	2,1	2,55	0,103	2,57	4,85	0,53
3	2,2	2,55	0,137	3,42	5,58	0,61
4	2,3	2,55	0,178	4,46	6,37	0,70
5	2,4	2,55	0,250	6,25	7,24	0,86
6	2,5	3,36	0,216	7,12	8,18	0,87
7	2,6	3,36	0,246	8,10	9,20	0,88

Продолжение таблицы 4.1

№ п/п	Диаметр дробинки, $d$ , мм	Масса груза $m$ , кг	Среднее значение высоты сбрасывания груза, $h_{cp}$ , м	Энергия удара, $E$ , Дж	Объем дробинки $V$ , мм <sup>3</sup>	Удельные энергозатраты $e_v$ , Дж/мм <sup>3</sup>
8	2,7	4,15	0,223	9,08	10,31	0,88
9	2,8	4,96	0,203	9,88	11,49	0,86
10	2,9	4,96	0,226	10,99	12,77	0,86

На рисунке 4.1 представлены точки данных энергии удара и удельных энергозатрат и их аппроксимирующие функции ((1) и (2)) при разрушении частиц дробы разного диаметра прямым стесненным ударом.

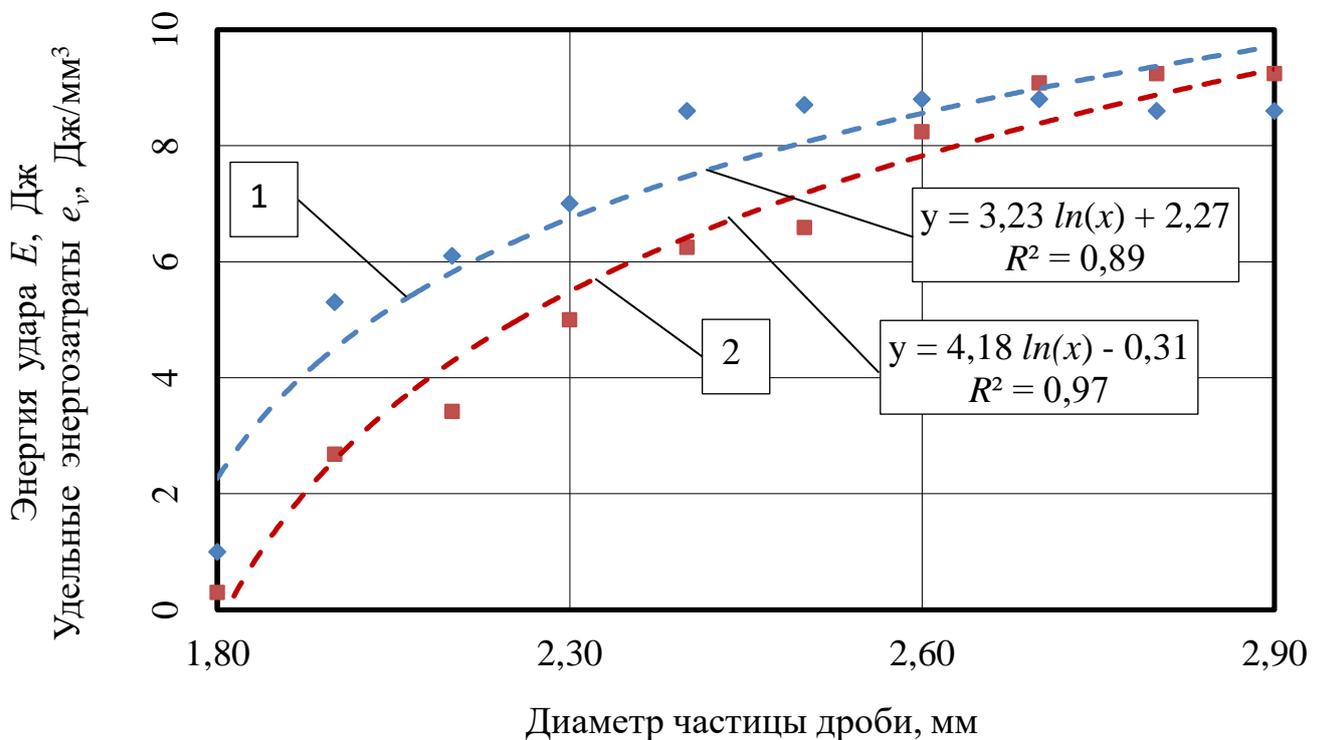


Рисунок 4.1 — Графики зависимостей энергии удара (1) и удельных энергозатрат (2) при разрушении частиц дробы различного диаметра и их аппроксимирующие функции

На основании полученных результатов экспериментальных исследований можно утверждать, что для разрушения стальной сферической дроби прямым стесненным ударом требуется затратить значительно меньше энергии, чем при свободном ударе. Зависимости, описывающие энергосиловые параметры процесса разрушения стальной дроби стесненным ударом, носят логарифмический характер и при увеличении диаметра дроби удельные энергозатраты и сама энергия удара постепенно снижаются.

Предварительные результаты исследования процесса разрушения стальной сферической дроби указывают на то, что необходимо исследовать экспериментально процесс разрушения слоя дроби стесненным ударом.

#### 4.2 Экспериментальное исследование процесса раскалывания слоя дроби прямым стесненным ударом

При проведении лабораторных экспериментальных исследований по раскалыванию стальной дроби стесненным ударом получены численные значения количества дробинок, разрушаемых стесненным ударом молота маятникового копра от скорости ударного контакта [124, 125], представленные в таблицах 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2 — Результаты экспериментальных исследований процесса разрушения слоя дроби диаметром 2,1...2,5 мм стесненным ударом

№ п/п	$n_0$ , штук	$\varphi_k$	$n_1$ , штук	$n_2$ , штук	$E$ , Дж	$E_1$ , Дж	$e$ , Дж/мм <sup>3</sup>
1	5	20°	5	—	5,69	1,14	0,18
2	5	19°	4	1	4,42	1,11	0,17
3	5	20°	5	—	5,69	1,14	0,18
4	6	20°	6	—	5,69	0,95	0,15
5	10	22°	10	—	8,40	0,84	0,13
6	10	20°	5	5	5,69	1,14	0,18

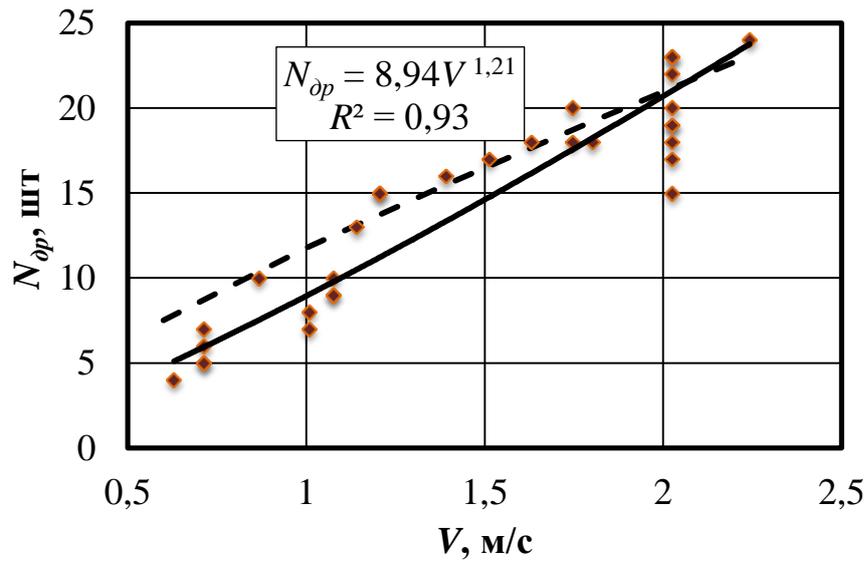
Продолжение таблицы 4.2

№ п/п	$n_0$ , штук	$\varphi_k$	$n_1$ , штук	$n_2$ , штук	E, Дж	$E_1$ , Дж	$e$ , Дж/мм <sup>3</sup>
7	10	25°	10	5	12,93	1,29	0,20
8	10	24°	8	2	11,36	1,42	0,22
9	10	24°	5	5	11,36	2,27	0,36
10	10	25°	9	1	12,93	1,44	0,23
11	15	25°	6	9	12,93	2,15	0,34
12	15	27°	15	–	16,25	1,08	0,17
13	15	27°	15	–	16,25	1,08	0,17
14	15	26°	13	2	14,56	1,12	0,18
15	20	30°	16	4	21,67	1,35	0,21
16	20	32°	17	3	25,57	1,50	0,24
17	20	34°	18	2	29,69	1,65	0,26
18	20	36°	20	–	34,03	1,70	0,27
19	20	36°	18	2	34,03	1,89	0,30
20	20	37°	18	2	36,28	2,02	0,32
21	20	41°	18	2	45,81	2,55	0,40
22	23	41°	15	8	45,81	3,05	0,48
23	23	41°	17	6	45,81	2,69	0,42
24	25	41°	23	2	45,81	1,99	0,31
25	25	41°	19	6	45,81	2,41	0,38
26	25	41°	20	5	45,81	2,29	0,36
27	25	45°	24	1	56,14	2,34	0,37
28	30	41°	22	8	45,81	2,08	0,33
29	30	41°	19	11	45,81	2,41	0,38
30	35	41°	23	12	45,81	1,99	0,31

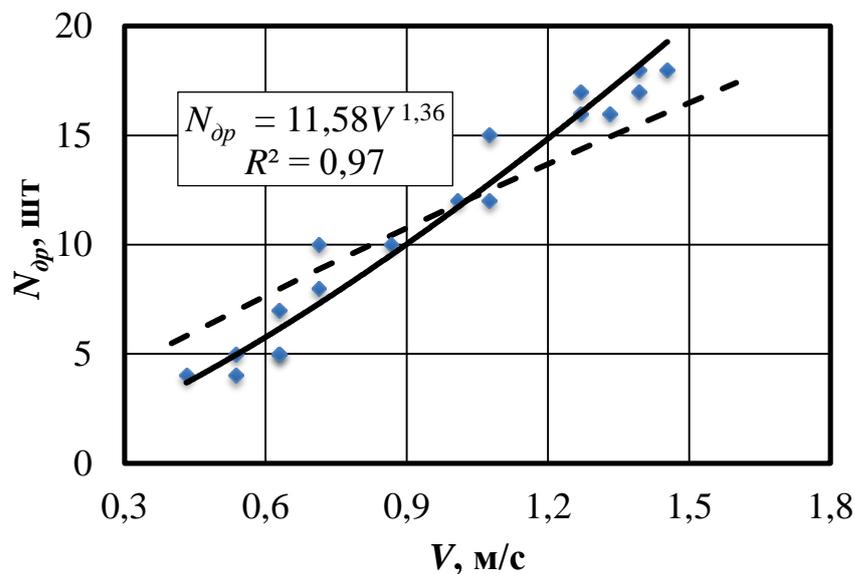
Таблица 4.3 — Результаты экспериментальных исследований процесса разрушения слоя дроби диаметром 2,6...3,0 мм стесненным ударом

№ п/п	$n_0$ , штук	$\varphi_k$	$n_1$ , штук	$n_2$ , штук	$E$ , Дж	$E_1$ , Дж	$e$ , Дж/мм <sup>3</sup>
1	5	20°	5	—	5,69	1,14	0,10
2	5	19°	5	—	4,42	0,88	0,08
3	5	18°	5	—	3,22	0,64	0,06
4	5	17°	1	4	2,08	2,08	0,18
5	5	18°	4	1	3,22	0,80	0,07
6	10	22°	10	—	8,40	0,84	0,07
7	10	20°	10	—	5,69	0,57	0,05
8	10	19°	7	3	4,42	0,63	0,05
9	10	20°	8	2	5,69	0,71	0,06
10	15	25°	15	—	12,93	0,86	0,08
11	15	24°	12	3	11,36	0,95	0,08
12	15	25°	12	3	12,93	1,08	0,09
13	20	28°	19	1	17,99	0,95	0,08
14	30	28°	26	4	17,99	0,69	0,06
15	30	29°	26	4	19,80	0,76	0,07
16	20	30°	19	1	21,67	1,14	0,10
17	20	31°	18	2	23,59	1,31	0,11
18	20	30°	18	2	21,67	1,20	0,10

На основании значений, полученных в ходе экспериментальных исследований, построены графические зависимости количества дробинок, разрушаемых стесненным ударом молота маятникового копра от скорости ударного контакта (см. рисунок 4.2). Скорость ударного контакта определялась согласно методу определения скорости свободного падения тел в зависимости от угла отклонения маятника  $\varphi_k$ .



а)



б)

————— — эмпирические значения; — — — — — теоретические значения;

а — для дробы диаметром 2,3 мм; б — для дробы диаметром 2,8 мм

Рисунок 4.2 — Графики зависимостей количества дробинки, разрушаемых одиночным ударом молота маятниково копра от скорости ударного контакта

Для определения значения экспериментального коэффициента пропорциональности предела прочности материала  $k_{\sigma}$ , зависящего от физико-механических свойств дробы и условий контактного нагружения, сопоставлялись данные, полу-

ченные по предложенной формуле (3.3) (с коэффициентом  $k_{\sigma} = 3,06$  [104–108]) и определенные в результате проведения экспериментов по раскалыванию дроби. В итоге получено уточненное значение коэффициента предела прочности материала в условиях наложения стесненного удара —  $k_{\sigma} = 4,6$  для условий дробления стальной сферической дроби, изготовленной из стали марки 80 ГСЛ с физико-механическими свойствами, указанными выше.

В виде регрессионной модели зависимость аппроксимирующей функции для определения количества дробин, разрушаемых одиночным ударом молота маятникового копра, от скорости ударного контакта для стальной дроби имеет форму степенной функции:

$$N_{dp} = kV^a, \quad (4.1)$$

где  $k$ ,  $a$  — коэффициент и показатель степенной функции соответственно.

Проведение эксперимента предполагало использование двух фракций стальной дроби: 2,3 и 2,8 мм. Результаты аппроксимации методом наименьших квадратов [126] в виде показателей и коэффициентов степенной функции от скорости ударного контакта для двух случаев отображены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 — Результаты аппроксимирования результатов эмпирических исследований

Средний диаметр раскалываемой дроби, мм	Коэффициенты и показатели степенной функции	
	$k$	$a$
2,3	11,58	1,36
2,8	8,94	1,21

Коэффициент корреляции и ошибка аппроксимации в первом случае составили 0,97 и 10,2 % соответственно, во втором случае — 0,94 и 14,1 %.

Средняя относительная разница результатов теоретических и экспериментальных исследований в опытах составила 20,1%, а адекватность математической модели — 79,9 %.

### 4.3 Экспериментальное обоснование метода определения конструктивных параметров роторно-ударного измельчителя

При проведении экспериментов по определению мощности привода роторно-ударного измельчителя получены следующие эмпирические значения при дроблении стальной сферической дроби —  $W_1$  (см. таблицу 4.5).

Таблица 4.5 — Экспериментальные значения мощности привода роторно-ударного измельчителя

№ эксперимента	Мощность привода измельчителя $W_1$ , Вт
1	125
2	135
3	175
4	180
5	130
6	155
7	100
8	185
9	140
10	145
11	135
12	140
13	145

После обработки данных получены коэффициенты регрессии и соответствующие экспериментальные значения критерия Стьюдента  $t_3$ , представленные в таблице 4.6, из которой следует, что все коэффициенты полиномиальных зависимостей являются значимыми.

Таблица 4.6 — Значение коэффициентов регрессии и критериев Стьюдента  $t_3$

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента	Значение критериев Стьюдента $t_3$
$b_0$	145,03	$1,17 \times 10^3$
$b_1$	4,53	66,28
$b_2$	0,17	368,01
$b_{11}$	25,13	3,3
$b_{22}$	0,17	3,3
$b_{12}$	-1,25	18,63

На основании результатов определения значимости коэффициентов регрессионной зависимости получена адекватная функция отклика, представленная следующей полиномиальной зависимостью:

$$y(x_1, x_2) = 4,53x_1 + 25,13x_2 + 0,17x_1^2 + 0,17x_2^2 - 1,25x_1x_2 + 145,03. \quad (4.2)$$

Согласно статистической обработке полученных данных в ходе исследований методами математической статистики [92–96], критерии Кохрена и Фишера составили  $F_{K_1} = 5,12$ ,  $F_{\phi_1} = 6,29$ , что подтверждает достоверность полученной регрессионной модели и адекватность полученной математической модели.

В натуральном виде [92–96] зависимость (4.2) принимает следующий вид:

$$W = 48,2m_m + 36,51\omega + 4,97m_m^2 + 0,17\omega^2 - 6,93m_m\omega - 112,9. \quad (4.3)$$

С целью подтверждения адекватности разработанной математической модели необходимой мощности привода роторно-ударного измельчителя проведен сравнительный анализ значений, полученных по аналитической формуле (3.92) и регрессионной зависимости (4.3), представленный в таблице 4.7.

Таблица 4.7 — Значения необходимой мощности привода роторно-ударного измельчителя, полученные по аналитической и регрессионной зависимостям и относительной погрешности эксперимента

№ п/п	Результаты		Относительная погрешность, %
	По регрессионной зависимости (4.3)	По формуле (3.92)	
1	119,5	113,5	5,3
2	123,8	128,6	3,7
3	166,3	169,8	2,1
4	172,5	179,9	4,1
5	141,7	139,0	2,0
6	149,2	156,8	4,9
7	111,9	109,9	1,8
8	179,4	186,0	3,6
9	145,5	141,1	3,1
10	145,5	141,1	3,1
11	145,5	141,1	3,1
12	145,5	141,1	3,1
13	145,5	141,1	3,1
Средняя относительная погрешность, %			3,3

Статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что относительная погрешность определения необходимой мощности привода измельчителя по зависимости (3.92) в сравнении с эмпирическими значениями, полученными в ходе экспериментальных исследований, составляет 3,3 %.

С целью наглядного сопоставления друг с другом значений, определенных по предложенной аналитической зависимости (3.92) и результатов экспериментальных исследований, полученных по эмпирической формуле (4.3) построены графики поверхностей, описываемых зависимостями мощности привода роторно-ударного измельчителя (см. рисунки 4.3 и 4.4) в соответствии с аналитической и регрессионной моделями.

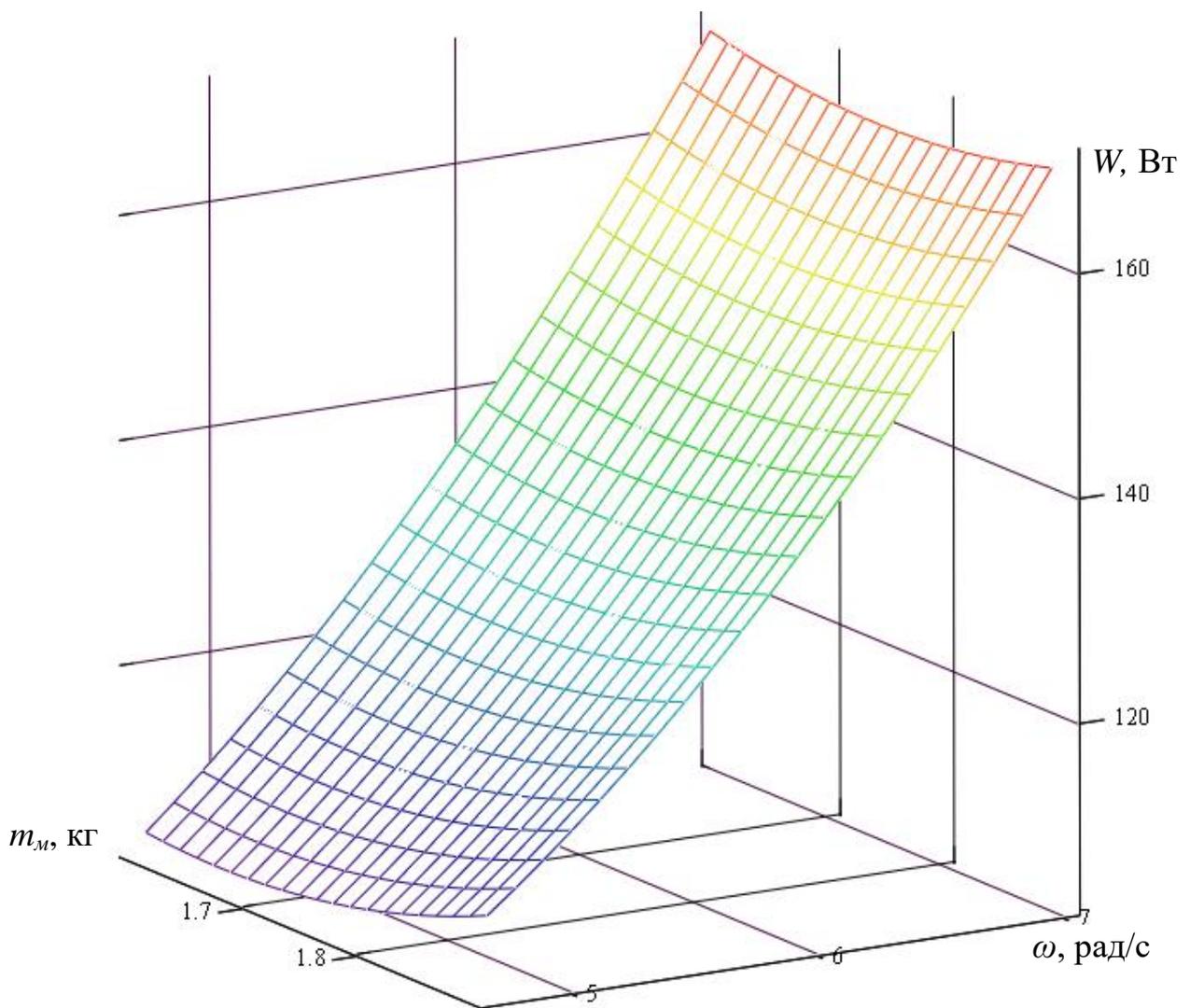


Рисунок 4.3. — График поверхности регрессионной зависимости мощности привода роторно-ударного измельчителя

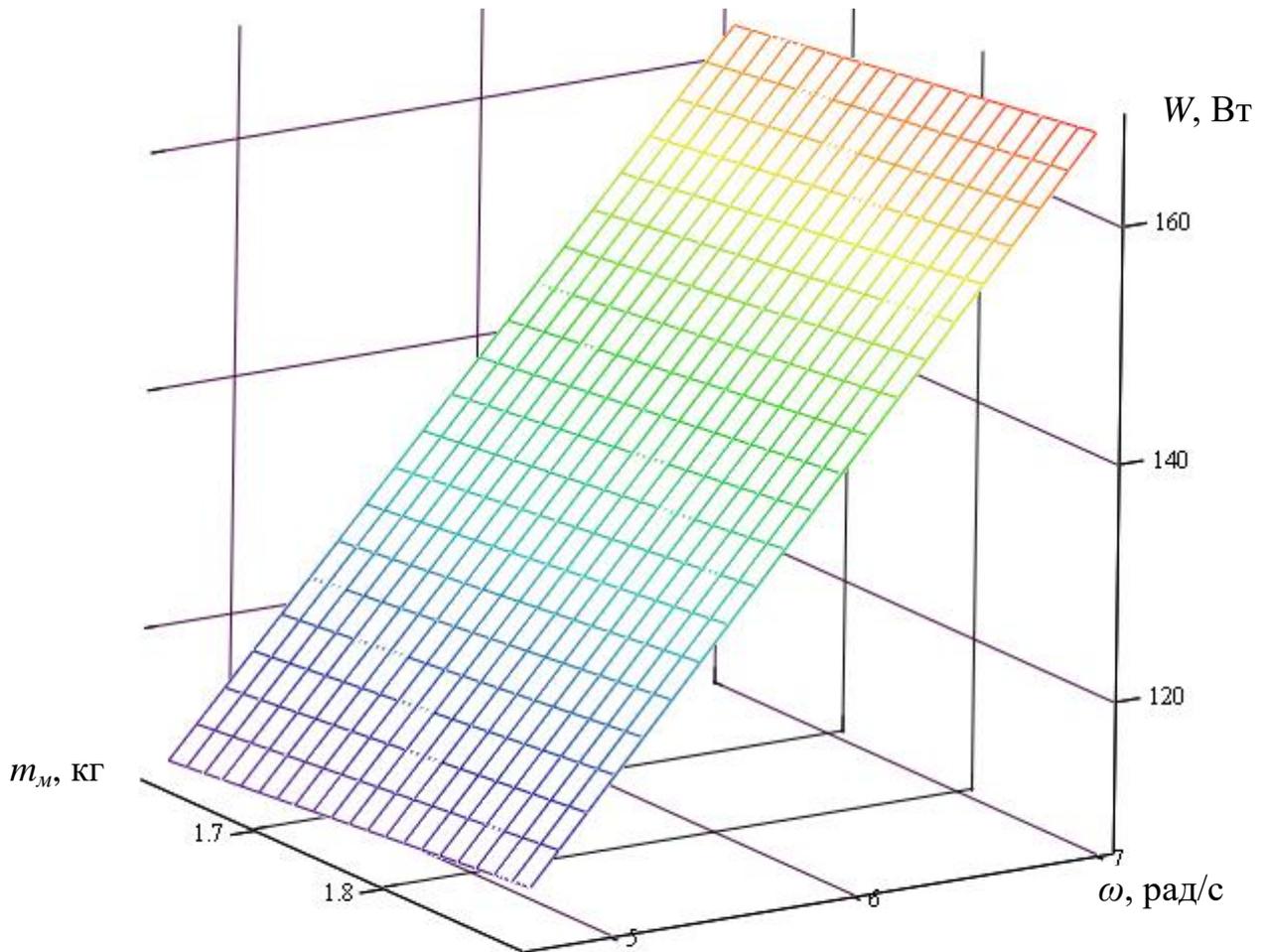


Рисунок 4.4. — График поверхности аналитической зависимости мощности привода роторно-ударного измельчителя

Как видно из анализа графических зависимостей, представленных на рисунках 4.3 и 4.4, поверхность, полученная с помощью теоретической зависимости (3.92), описывающая характер изменения мощности привода роторно-ударного измельчителя, достаточно близко совпадает с графиком поверхности эмпирических значений, что подтверждает адекватность результатов предшествующих аналитических исследований, в частности зависимости для определения необходимой мощности электродвигателя привода роторно-ударного измельчителя в процессе измельчения сферической дроби.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований подтверждена математическая модель процесса измельчения сферической дроби в роторно-ударном измельчителе, а также метод обоснования энергосиловых параметров ро-

торно-ударного измельчителя, применяемого при измельчении различных видов дробы.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс (см. приложение Б).

#### **Выводы к разделу 4**

1. Проведено экспериментальное исследование процесса раскалывания единичной частицы стальной сферической дробы стесненным ударом, с помощью которого установлено, что для ее разрушения прямым стесненным ударом требуется затрачивать значительно меньше энергии, чем при свободном ударе.

2. Экспериментально подтверждена адекватность разработанной математической модели процесса ударного контакта мелющих тел с дробимым материалом — средняя относительная погрешность результатов определения количества дробинки разрушаемых прямым стесненным ударом аналитическим методом составила 20,1 % по сравнению с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований в лабораторных условиях, а адекватность самой математической модели — 79,9 %.

3. Проведено моделирование процесса измельчения дробы в физической модели роторно-ударного измельчителя. На основании центрального композиционного ротатабельного униформпланирования второго порядка получена регрессионная модель необходимой мощности привода, с помощью которой обоснована адекватность метода расчета мощности электродвигателя привода измельчительной машины. Средняя относительная погрешность разработанного аналитического метода составила 3,3 %.

## РАЗДЕЛ 5

ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Стальная колотая дробь, по сравнению с круглой, обладает значительно более высокой абразивной способностью при дробеструйной обработке различных деталей в машиностроительной промышленности. В этой связи данная продукция заводов стальной дроби пользуется повышенным спросом при условии приближения отпускной цены к цене круглой стальной дроби.

Для разрушения стальной дроби на ООО «Завод стальной дроби» используются две шаровые мельницы МШР-1500×1600. Согласно ГОСТ 10141-91 данные мельницы имеют следующие параметры:

внутренний диаметр барабана (без футеровки),  $D_{\bar{o}} = 1500$  мм;

длина барабана,  $L_{\bar{o}} = 1670$  мм;

частота вращения барабана,  $n_{\bar{o}} = 30$  об/мин;

мощность приводного электродвигателя,  $P_{\bar{o}в} = 55$  кВт;

частота вращения вала электродвигателя,  $n_{\bar{o}в} = 970$  об/мин;

габаритные размеры шаровой мельницы, не более:

длина,  $L_m = 4900$  мм;

ширина,  $B_m = 3300$  мм;

высота,  $H_m = 2500$  мм.

масса мельницы без электродвигателя,  $M_m = 16,5$  т;

масса шаровой загрузки,  $M_{ш} = 4,8$  т.

К основным недостаткам шаровой мельницы можно отнести:

1. Повышенная металлоемкость.
2. Необходимость применения футеровки по всей внутренней поверхности барабана (толщина футеровки может достигать до 100 мм).
3. Повышенный износ мелющих тел.
4. Большие затраты на электроэнергию.
5. Значительное переизмельчение готового продукта.

Для сравнения эффективности работы шаровой мельницы и предлагаемого роторно-ударного измельчителя воспользуемся несколькими критериями:

1. Удельная мощность, представляющая собой отношение мощности привода к производительности установки:

$$\text{для шаровой мельницы: } k_{w1} = 55 / 1,2 = 45,8;$$

$$\text{для роторно-ударного измельчителя: } k_{w2} = 17,2 / 1,0 = 17,2.$$

Превышение мощности составляет  $k_{w1} / k_{w2} = 45,8 / 17,2 = 2,66$  раза.

2. Удельная металлоемкость, представляющая собой отношение массы установки к ее производительности:

$$\text{для шаровой мельницы: } k_{m1} = 21,3 / 1,2 = 17,75;$$

$$\text{для роторно-ударного измельчителя: } k_{m2} = 9,2 / 1,0 = 9,2.$$

Превышение массы составляет  $k_{m1} / k_{m2} = 17,75 / 9,2 = 1,93$  раза.

Применение более эффективных способов производства колотой дроби, за счет создания центрального прямого удара, обеспечивает увеличение выхода годной продукции до 14 %, а также существенное снижение расхода мелющих тел (шаров) за счет снижения их износа до 20 %

Кроме того, данная технология позволяет сократить потребление электроэнергии не только на измельчительные процессы в шаровых мельницах, но и на выплавку стали для получения исходной дроби круглой формы.

Производительность установленной на заводе шаровой мельницы составляет  $\Pi_{ш} = 1,2$  т/ч дроби при установленной паспортной мощности электродвигателя  $P_{ном} = 55$  кВт.

Удельные затраты электроэнергии на раскалывание дроби составляют:

$$\mathcal{E}_{py} = P_{ном} / \Pi_{ш} = 55 / 1,2 = 45,8 \text{ кВт/т.} \quad (5.1)$$

За счет увеличения годной продукции путем снижения потерь на переизмельчение на 14 % экономия электроэнергии на 1 т. при цене электроэнергии  $C_э = 3,69$  руб. составит:

$$\mathcal{E}_{п1т} = \mathcal{E}_{пу} \times 0,14 \times C_э = 45,8 \times 0,14 \times 3,69 = 23,66 \text{ руб/т.} \quad (5.2)$$

Годовая экономия на процесс производства стальной колотой дроби по усовершенствованной технологии в количестве  $\Pi_r = 30000$  т/г составит:

$$\mathcal{E}_{рг} = \mathcal{E}_{1т} \times \Pi_r = 23,66 \times 30000 = 709800 \text{ руб/год.} \quad (5.3)$$

Так как плавление стали осуществляется в дуговых электропечах, удельные энергозатраты которых  $\mathcal{E}_п = 195\text{--}275$  кВт на 1 тонну стали [2], то экономия энергозатрат на плавку 1 т стали составит:

$$\mathcal{E}_{пу} = \mathcal{E}_п \times 0,14 = (195 \div 275) \times 0,14 = 27,3 \div 38,5 \text{ кВт/т.} \quad (5.4)$$

Годовая экономия на процессы выплавки стали при экономии дроби на 14 % составит:

$$\mathcal{E}_{пг} = \mathcal{E}_{пу} \times \Pi_p = (27,3 \div 38,5) \times 30000 = 819000 \div 1155000 \text{ руб/год.} \quad (5.5)$$

Экономия на расходе мелющих тел при годовой их потребности и стоимости закупки  $C_{мт} = 28000$  руб/т. Расход мелющих тел составляет около  $P_{мт} = 0,5$  кг/т готовой продукции [3].

Годовая потребность в мелющих телах:

$$\Pi_{мтг} = \Pi_r \times P_{мт} = 30000 \times 0,0005 = 15 \text{ т.} \quad (5.6)$$

Экономия материальных затрат на закупку мелющих тел при их экономии в 20 % составит:

$$\mathcal{E}_{мтг} = \Pi_{мтг} \times 0,20 \times C_{мт} = 15 \times 0,20 \times 28000 = 84000 \text{ руб.} \quad (5.7)$$

Суммарная ожидаемая годовая экономия материальных средств:

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\text{рг}} + \mathcal{E}_{\text{шт}} + \mathcal{E}_{\text{мгг}} = 709800 + (819000 \div 1155000) + 84000 = 1612800 \div 1948800 \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Расчет срока окупаемости выполнен для наиболее дорогого в реализации технологического процесса раскалывания по принципу стесненного прямого удара при условии разработки и создании специальной установки и сопутствующей ей оборудования.

1. Необходимые инвестиционные ресурсы для реализации проекта.

Составляющие инвестиционных ресурсов:

- 1) затраты на изготовление элементов конструкций 1200000 руб.;
- 2) приобретение оборудования и комплектующих 200000 руб.;
- 3) пусконаладочные работы 100000 руб.

Составляющие расчета:

1) ожидаемый средний годовой экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной дроби:

$$E = (1612800 \div 1948800) / 2 = 1780800 \text{ руб.} \quad (5.9)$$

2) затраты на изготовление элементов конструкций, приобретение оборудования и комплектующих и пусконаладочные работы 1500000 руб.

3) срок окупаемости:

$$T_{\text{окуп}} = 15000000 / 1780800 = 0,84 \text{ года (10,1 месяца)} \quad (5.10)$$

Примечание: расчет годового экономического эффекта от внедрения роторно-ударного измельчителя в производство стальной колотой дроби выполнен в условиях ООО «Завод стальной дроби» (см. приложение В) и производился в ценах третьего квартала 2020 года.

**Выводы к разделу 5**

1. 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.

2. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной дроби, реализуемого в предлагаемой конструкции роторно-ударного измельчителя (см. приложение Г), в условиях ООО «Завод стальной дроби» составит 1780800 руб, срок окупаемости — 10,1 месяца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Рассмотрены особенности применения стальной дроби 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 дроби, а используемые в данное время шаровые мельницы обладают относительно невысокой эффективностью (коэффициент полезного действия не превышает 20 %) и их использование в условиях производства остроугольной дроби 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 дроби 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 дроби. Для проведения экспериментальных исследований процесса разрушения дроби и обоснования ос-

новых 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 дробинки, 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 дроби.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов, Д. Ю. Бластинг: Гид по высокоэффективной абразивоструйной очистке [Текст] / Д. Ю. Козлов. — Екатеринбург: ООО «ИД «Оригами», 2007. — 216 с.
2. Козлов, Д. Ю. Практика безопасности при струйной очистке [Текст] / Д. Ю. Козлов. — М.: ООО «ИД «Оригами», 2012. — 240 с.
3. Виды абразивной (пескоструйной) обработки. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://electro-shema.ru/samodelnye-stanki/sharovajamelnitsa.html>.
4. Бабич, В. Е. Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. Т. 2. [Текст] / Бабич В. Е., Д. А. Багрец, М. А. Белоцерковский и др. — Витебск: УО ВГТУ, 2018. — 512 с.
5. Гурченко, П.С. Производство стальной литой термообработанной дроби в условиях машиностроительных предприятий [Текст] / П. С. Гурченко и др. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 113 с.
6. Богачев, И. Н. Справочник литейщика. Чугунное литье [Текст] / И. Н. Богачев, Н. П. Дубинин, И. П. Егоренков, др. ; общ. ред. Н. Н. Рубцов . — М. : Машгиз, 1961. — 774 с.
7. Balan, Kumar. An insider's perspective. The Critical Role of Metallic Shot in Achieving Consistent Shot Peening Results / The Shot Peener. Fall 2017. — P. 12–18.
8. Ervin Industries. Technical Bulletin (Vol No. VIII: Issue No. 6: July 2003, found on [ervinindustries.com](http://ervinindustries.com)).
9. Обработка стальной дробью. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://shotblasting.ru/sites/default/files/news\\_page/Blasting%20with%20Steel%20Ru.pdf](https://shotblasting.ru/sites/default/files/news_page/Blasting%20with%20Steel%20Ru.pdf).
10. «Вилабратор Аллевар Урал» Система РАЛ-Инфо для металлургов, машиностроителей, заказчиков литых и формованных изделий из металлов, пласт-

масс, эластомеров и композитов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ruscastings.ru/work/168/441/1702/8831>.

11. ГОСТ 11964-81 Дробь чугунная и стальная техническая. Общие технические условия [Текст] – Введ. 01–01–1983. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 3 с.

12. Гурченко, П.С. Производство стальной литой термообработанной дроби в условиях машиностроительных предприятий [Текст] / П.С. Гурченко [и др.]. — Минск: Беларус. Навука, 2014. — 113 с.

13. Андреев, С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых [Текст] / С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. — М.: Недра, 1980. — 415 с.

14. Gilvarry, J. J. Fracture of brittle solids. I. Distribution function for fragment size in single fracture (Theoretical) [Текст] / J. J. Gilvarry // J. Appl. Phys, 1961. Vol. 32.— № 3. — P. 391–399.

15. Gilvarry, J. J. Fracture of brittle solids. II. Distribution function for fragment size in single fracture (Experimental) [Текст] / J. J. Gilvarry, В. Н. Bergstrom // J. Appl. Phys, 1961. V. 32, — № 3. — P. 400–410.

16. Сильвестров, В. В. Фрагментация стальной сферы при высокоскоростном ударе по тонкому высокопористому экрану [Текст] / В. В. Сильвестров // Физика горения и взрыва, 2004. Т. 40, — №2. С. 155–141.

17. Завод стальной дроби (ЗСД). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.shot-works.com/>.

18. Павлиненко, О. И. Особенности структурообразования и производства колотой стальной дроби [Текст] / О. И. Павлиненко, М. А. Савицкая, Э. П. Левченко // Материаловедение: материалы республиканской студенческой научно-практической конференции. — Донецк: ДонНТУ, 2017. — С. 44–48.

19. Ревнивцев, В. И. Подготовка минерального сырья к обогащению и переработке [Текст] / В. И. Ревнивцев, Е. И. Азбель, Е. Г. Баранов и др. — М.: Недра, 1987. — 307 с.

20. Нержавеющая дробь Rometon для обработки поверхностей. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://graninox.ru/>.
21. ДСТУ 3184–95. Дріб сталевий та чавунний технічний. Загальні технічні умови [Текст]. — Введ. 01–09–96. — К. : Вид-во стандартів, 1996. — 14 с.
22. SAE J445. Metallic Shot and Grit Mechanical Testing (Rev. Apr. '96).
23. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Музеймек. — М.: Машиностроение, 1990. — 320 с.
24. Серго, Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых: учеб. для вузов [Текст] / Е. Е. Серго. — М.: Недра. 1985. — 285 с.
25. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности [Текст] / П. М. Сиденко. — М. : Химия, 1977. — 368 с
26. Павлиненко, О. И. Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дроби [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, В. Г. Чебан // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Специальный выпуск «Металлургические процессы и оборудование». — Донецк, 2016. — №4 (3). — С. 38–44.
27. Левченко, Е. П. Інтенсифікація технологічного процесу подрібнення зерна на комбікорм у відцентрово-ударному млині [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Левченко Едуард Петрович. — Луганськ: ЛНАУ, 2001. — 20 с.
28. Левченко Э. П. Обобщенный 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 : сб. науч. тр. межд. науч.-прак. конф. — Кемерово, 2016. — С. 88–93.
29. Левченко, Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-ти летней изобретательской деятельности): монография [Текст] / Э. П. Левченко, А. М. Зинченко, О. А. Левченко. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДрнГТУ», 2018. — 353 с.

30. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие [Текст] / В. Я. Борщев. — Тамбов: Издательство Тамбовского Государственного технического университета, 2004. — 75 с.
31. Кравцов, Е. Д. Общие сведения по дроблению пород и руд [Текст] / Е. Д. Кравцов, В. И. Игнатов, А. В. Лисица. — М.: Химия, 1998. — 572 с.
32. Павлиненко, О. И. Повышение эффективности процесса 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, 2016. — С. 86–91.
33. Subba Rao, D. V. Minerals and Coal Process Calculations [Текст] / D. V. Subba Rao. — London: Taylor & Francis Group, 2016. — 354 p.
34. Павлиненко, О. И. Повышение эффективности приготовления стальной колотой дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, К. Д. Семенюк, Э. П. Левченко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 3-й международной научно-практической конференции. — Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2017. — С. 78–81.
35. Барон, Л. И. Разрушаемость горных пород свободным ударом [Текст] / Л. И. Барон, И.Е. Хмельковский. — М.: Наука, 1971. — 203 с.
36. Павлиненко, О. И. Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах [Текст]: монография / О. И. Павлиненко и др. — Алчевск, Донбасский государственный технический университет, 2016. — 225 с.
37. Левченко, Э. П. Интенсификация технологического процесса измельчения зерна на комбикорм в центробежно-ударной мельнице [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Левченко Эдуард Петрович; — Луганск, 2001. — 179 с.
38. Товаров, В. В. Исследование вылета частиц из лопастных роторов центробежных измельчающих машин: труды института Гипроцемент [Текст] / В. В. Товаров, Г. Н. Оскаленко. — Днепропетровск: Госстройиздат, 1962. — С. 64–91.

39. Патент №2029618 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/24. Центробежная дробилка / Онопченко А. Н., Зинченко А. М., Левченко Э. П., Сухомлин Р. М.; заявитель и патентообладатель Левченко Э. П. — № 4904937; заявл. 24.01.1991; опубл. 27.02.1995, Бюл. № 6. — 4 с.: ил.

40. Учитель, С. А. Опыт применения центробежно-ударных дробилок [Текст] / С. А. Учитель, В. А. Стець // Институт «Черметинформация». Сер. Обогащение руд. — Вып. 1. — М., 1991 — 25 с.

41. Ребиндер, П. А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер. — М.: Наука, 1979. — 386 с.

42. Левченко, Э. П. Применение разгонно-ударных мельниц для раскалывания стальной дроби и особенности их скоростных расчетов [Текст] / Э. П. Левченко, О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып 3. (46). — Алчевск: ДонГТУ, 2016. — С. 143–148.

43. Павлиненко, О. И. Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дроби [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, В. Г. Чебан // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Специальный выпуск «Металлургические процессы и оборудование». Донецкая политехника. — Донецк, 2016. — №4 (3). С. 38–44.

44. 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.

45. Власенко, Д. А. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору [Текст] / Д. А. Власенко, О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко. Вестник Донецкого национального технического университета, 2016. — № 3 (3). — С. 21–26.

46. Павлиненко, О. И. Пути повышения эффективности процесса производства колотой стальной дроби [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко,

Д. А. Вишнеvский // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. — Липецк: изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2016. — С. 211–215.

47. Тумин, А. Н. Использование гидропривода в центробежной разгонно-ударной мельнице [Текст] / А. Н. Тумин, Э. П. Левченко, О. И. Павлиненко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып 7. (50). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 158–163.

48. Lynch, Alban J. The History of Grinding [Текст] / Alban J. Lynch, Chester A. Rowland. — Littleton: SME, 2005. — 209 p.

49. Павлиненко, О. И. Оценка возможностей приготовления колотой дроби на основе инновационных подходов [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов международной научно-практической конференции. — Кемерово: издательство Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева, 2017. — С. 359–362.

50. Блохин, В. С. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: учебное пособие. Ч. 1. [Текст] / В. С. Блохин, В. И. Большаков, Н. Г. Малич. — Днепропетровск: ИМА-пресс, 2006. — 404 с.

51. Перов, В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых [Текст] / В. А. Перов, С. Е. Андреев, Л. Ф. Биленко. — М. : Недра, 1990. — 301 с.

52. Линч, А. Дж. Циклы дробления и измельчения [Текст] / А. Дж. Линч. — М.: Недра, 1981. — 343 с

53. Френкель, Я. И. Теория обратимых и необратимых трещин в твердых телах [Текст] / Я. И. Френкель // Журнал технической физики, 1952. — Т., 22. — № 11. — С. 1857–1866.

54. Griffith, A. A. The phenomenon of rupture and flow in solids [Текст] // Phil. Trans. Roy. Soc., ser. A, 1920. — V. 221. — P. 163–198.

55. Пановко, Я. Г. Введение в теорию колебаний и удара [Текст] / Я. Г. Пановко. — М.: Наука, 1989 — 264 с.
56. Горбунов, В. Ф. Импульсный гидропривод горных машин [Текст] / В. Ф. Горбунов, А. Г. Лазуткин, Л. С. Ушаков. — Новосибирск: Наука, 1986. — 197 с.
57. Ляпцев, С. А. Параметры многомассового ударного механизма для разрушения горных пород [Текст] / С. А. Ляпцев, Н. Р. Степанова // Фундаментальные исследования, 2014. — № 12 (часть 8). — С. 1649–1651.
58. Виноградов, В. Н. Изнашивание при ударе [Текст] / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев. М.: Машиностроение, 1982. — 192 с.
59. Веллинггер, Е. Изнашивание струей абразивного материала [Текст] / Е. Веллинггер, Г. Уэтц // Переводы и обзоры иностранной периодической литературы. — М.: 1956. — №2. — 52 с.
60. Сорокин, Г. М. Виды износа при ударном контактировании поверхностей [Текст] / Г. М. Сорокин. — М.: Машиностроение, 1974. — №3. — С. 84–89.
61. Леденев, В. В. Теоретические основы механики деформирования и разрушения: монография [Текст] / В. В. Леденев, В. Г. Однолько, З. Х. Нгуен. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. — 312 с.
62. Колесников, Ю. В. Механика контактного разрушения [Текст] / Ю. В. Колесников, Е. М. Морозов. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 224 с.
63. Кузнецов, В. Д. Физика твердого тела [Текст] / В. Д. Кузнецов. — Томск: Красное Знамя, 1944. Т.3. — 742 с.
64. Степанов, Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении [Текст] / Г. В. Степанов. — Киев: Наук. думка, 1991 — 288 с.
65. Фиргер, И. В. Термическая обработка сплавов: справочник [Текст] / И. В. Фиргер. — Л.: Машиностроение, 1982. — 304 с.
66. Иоффе, А. Ф. Прочность и предел упругости естественной каменной соли [Текст] / А. Ф. Иоффе // Труды Лен. физ.-техн. лаб., 1925, — С. 5.

67. Курс лекций «Механика деформирования и разрушения» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.studsell.com/view/81786/>.
68. Николаева, Е. А. Основы механики разрушения / Основы механики разрушения: учебное пособие [Текст] / Е. А. Николаева. Издательство Пермского гос. тех. ун-та, 2010. — 103 с.
69. Павлиненко, О. И. Перспективы получения колотой стальной дроби [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко и др. // Новые материалы и перспективные технологии: Сборник материалов Четвертой междисциплинарный научного форума с международным участием. Т. I. — М: ООО «Буки Веди», 2018. — С. 629–631.
70. 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.
71. Павлиненко, О. И. Экспериментальные исследования энергозатрат на раскалывание стальной дроби прямым стесненным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 7 (50). — Алчевск: ДонГТУ, 2017. — С. 158–163.
72. Каркашадзе, Г. Г. Механическое разрушение горных пород; учеб. пособие для вузов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5741803016.html>.
73. ГОСТ 10708–82 Копры маятниковые. Технические условия [Текст] — Введ. 30–06–1983. Измен. 12–09–2018. — М.: Изд-во стандартов, 1998. — 7 с.
74. Браунли, К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике / К. А. Браунли. Под ред. Л. Н. Большева. — М.: Наука, 1977. — 407 с.
75. Королук, В.С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королук [и др.]. — М.: Наука, 1985. — 640 с.
76. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л. И. Седов. — М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 432 с.

77. Алабужев, П. М. Теория подобия и размерностей. Моделирование [Текст] / П. М. Алабужев. — М.: Высш. шк., 1968. — 204 с.
78. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам теплоэнергетики [Текст] / В. А. Веников. — М.: Высш. шк., 1968. — 488 с.
79. Еронько, С. П. Расчет и конструирование оборудования для внепечной обработки и разлива стали [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских, Е. В. Ошовская. — К.: Техніка, 2007. — 344 с.
80. Гурский, П. П. Элементарная физика с примерами решения задач: Учебн. рук. [Текст] / П. П. Гурский. — М.: Наука, 1984. — 448 с.
81. Еронько, С. П. Моделирование процесса измельчения материала на одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / С. П. Еронько, Р. А. Удинцов, О. А. Левченко // *Металлургические процессы и оборудование*, 2012.— № 1. — С. 17–24.
82. VFD ASKPOWER A131 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cdn.hackaday.io/files/255641093730176/VFD%20ASKPOWER%20A131%20UserGuide.pdf>.
83. Цифровое многофункциональное реле MR63. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://electrica-shop.com.ua/files/DigiTop/Instruktsiya-k-rele-mnogofunktsionalnomu-napryazheniya-MR-63A.pdf>.
84. ГОСТ 4943–75 Ампервольтметры Н339 самопишущие переносные [Текст] – Введ. 20–08–1975. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 20 с.
85. ИО-10 тахометр [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://standart-pribor.com.ua/product/io-10-takhometr/>.
86. Паспорт и инструкция по эксплуатации. Электропривод ЭКТ 2Д. Запорожский электроаппаратный завод [Текст] — Запорожье, 1988. — 346 с.
87. Кузнецов, М. И. Основы электротехники [Текст] / М. И. Кузнецов. — М.: Профиздат, 1963. — 560 с.
88. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. — М.: Наука, 1965. — 230 с.

89. Левченко, Э. П. Построение экспериментальных моделей физических процессов в дробильно-измельчительных устройствах [Текст] / Левченко Э. П. [и др.]. // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов: сборник материалов Международной заочной научно-практической конференции. Биробиджан : БГТИ, 2016. — С. 90–94.

90. Белай, Г. Е. Организация металлургического эксперимента : учеб. пособие для вузов [Текст] / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко ; под ред. В.В. Дембовского. — М. : Металлургия, 1993. — 256 с.

91. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман [и др.] ; Пер. с нем. Г. А. Фомина и Н. С. Лецкой ; Под общ. ред. Э. К. Лецкого. — М. : Мир, 1977. — 552 с.

92. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов [Текст] / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. — М. : Колос, 1972. — 200 с.

93. Боровков, А. А. Курс теории вероятностей [Текст] / А. А. Боровков. — М. : Наука, 1972. — 542 с.

94. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента [Текст] / В. Б. Тихомиров. — М. : Легкая индустрия, 1974. — 262 с.

95. Левченко, Э. П. Особенности математического моделирования механических процессов металлургических машин [Текст] / Э. П. Левченко, Д. А. Вишневецкий, Д. А. Власенко и др. // Современные проблемы теории машин, 2016. — № 4–1. — С. 14–16.

96. Боровков, А. А. Курс теории вероятностей [Текст] / А. А. Боровков. М. : — Наука, 1972. — 542 с.

97. Целиков, А. И. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 1. Машины и агрегаты доменных цехов: учебник для вузов [Текст] / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник и др. — М. : Металлургия, 1987. — 440 с.

98. Хлебников, Г. Д. Исследование закономерностей разрушения горных пород при дроблении [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Хлебников Г. Д. — М. : Унив. дружбы народов им. Патриса Лумумбы, 1968. — 17 с.

99. Багян, Э. Р. Оценка характеристик процесса разлета макрочастиц после удара о твердую преграду [Текст] / Э. Р. Багян // Труды Фрунзенского политех. ин-та. — Фрунзе : 1973. — С. 47–49.
100. Бруяка, В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.
101. Федорова, Н. Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова [и др.]. — М. : ДМК Пресс, 2017. — 210 с.
102. Работнов, Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. — М. : Физматгиз, 1962. — 456 с.
103. Мороз, В. В. Обобщенный структурный подход к процессам механики дробильно-измельчительной техники металлургического комплекса [Текст] / В. В. Мороз, О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Приоритетные направления развития науки, техники и технологии: сборник трудов международной научно-практической конференции. — Кемерово : 2016. — С. 231–234.
104. Павлиненко, О. И. Обоснование конструктивно-технологических параметров роторной ударной мельницы для производства колотой дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — № 4 (18). — С. 3–9.
105. Пономарев, С. В. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 3: Инерционные нагрузки. Колебания и ударные нагрузки. Выносливость. Устойчивость [Текст] / С. В. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихачев и др. — М.: Машгиз, 1959. — 1118 с.
106. Арзамасов, Б. Н. Конструкционные материалы: справочник [Текст] / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др. — М. : Машиностроение, 1990. — 688 с.
107. Глушак, Б. Л. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках [Текст] / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, С. А. Новиков. — Новосибирск : Наука, 1992. — 295 с.

108. Огородников, В. А. Прочность некоторых марок стали и армко-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений  $2\div 200$  ГПа [Текст] / В. А. Огородников, Е. Ю. Боровкова, С. В. Ерунов // Физика горения и взрыва, 2004. Т. 40. — № 5. — Новосибирск : ИСО РАН. — С. 109–117.

109. Павлиненко, О. И. Аналитические приемы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дробы стесненным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Вып. 15 (58). — Алчевск : ДонГТУ, 2019. — С. 106–112.

110. Павлиненко, О. И. Исследования закономерностей движения рабочих органов ударной роторной мельницы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докл. IV Междунар. науч.-тех. конф. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019. — С. 11–14.

111. Иванов, А. С. Конструируем машины шаг за шагом [Текст] / В 2-х частях. Часть 1 [Текст] / А. С. Иванов. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 328 с.

112. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: справочник [Текст] / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. — М. : Машиностроение, 1993. — 640 с.

113. Борщев, В. Я. Оборудование для переработки сыпучих материалов: учебное пособие [Текст] / В. Я. Борщев, Ю. И. Гусев, М. А. Промтов и др. — М. : Машиностроение, 2006. — 208 с.

114. Электронный учебно-методический комплекс. Расчет и проектирование машин непрерывного транспорта. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1582/u\\_lecture.pdf](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1582/u_lecture.pdf).

115. Цыбуленко, П. В. Машины и оборудование обогатительных и перерабатывающих производств: методическое пособие по практическим занятиям [Текст] / П. В. Цыбуленко, Н. И. Березовский. — М.: БНТУ, 2013. — 35 с.

116. Романов, В. Н. О плотной упаковке твердых тел в трехмерном пространстве [Текст] / В. Н. Романов // Альманах современной науки и образования. — № 4 (106). — Тамбов: Грамота, 2016. — С. 106–109.

117. Дронг, В. И. Курс теоретической механики: учебник для вузов [Текст] / Дронг В. И., В. В. Дубинин, М. М. Ильин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — 735 с.

118. Медведев, Б. В. Начала теоретической физики. Механика, теория поля, элементы квантовой механики [Текст] / Б. В. Медведев — М.: Физматлит, 2007. — 38 с.

119. ГОСТ 5721–75. Подшипники роликовые радиальные сферические двухрядные. Типы и основные размеры [Текст] / Введ. 01.07.1977. Измен. 01.12.87. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 15 с.

120. Момент трения, потери мощности и пусковой момент подшипника [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.skf.com/ru/products/bearings-units-housings/principles/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/friction-powerloss-startingtorque/index.html>.

121. Зубарев, Д. Н. Физическая энциклопедия [Текст] / Д. Н. Зубарев. — М.: Советская энциклопедия, 1990. Т. 2. — 704 с.

122. Батиенков, В. Т. Расчет и проектирование механических приводов: учеб. пособие [Текст] / В. Т. Батиенков, А. И. Пуресев, В. А. Лепихова / — Новочеркасск: ЮРГПУ, 2015. — 77 с.

123. Усольцев, А. А. Электрический привод: учебное пособие [Текст] / А. А. Усольцев. — СПб: НИУ ИТМО, 2012. — 238 с.

124. Павлиненко, О. И. Анализ параметров процесса раскалывания стальной сферической дроби стесненным центральным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Черные металлы. — М. : АО «Издательский дом «Руда и Металлы»», 2020. — №8 (1064). — С. 29–33.

125. Павлиненко, О. И. Процесс разрушения стальной дроби центральным стесненным ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации про-

мышленных машин и агрегатов: материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Т. 3. — Донецк. 2019. — С. 104–108.

126. Armin, I. *Approximation Theory and Algorithms for Data Analysis (Texts in Applied Mathematics)* [Text] / I. Armin. — Springer, 2018. — 358 p.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения результатов диссертационной работы в производство

Утверждаю  
 Зам. директора ООО «Завод Стальной Дроби ЛТД»  
 \_\_\_\_\_ В.В. Положий  
 «17» ноября 2020 г.

#### АКТ внедрения результатов диссертационной работы ПАВЛИНЕНКО ОЛЬГИ ИГОРЕВНЫ

Научные и практические результаты исследований Павлиненко О.И. полученные в ходе подготовки диссертационной работы приняты к внедрению на ООО «Завод Стальной Дроби» для использования при совершенствовании технологии производства остроугольной колотой дроби путем применения нового способа разрушения материалов стесненным ударом. Установлено, что по сравнению с типовой шаровой мельницей с мощностью двигателя 55 кВт и производительностью 1,2 т/час вследствие повышения вероятности прямого удара при раскалывании дроби округлой формы за счет более эффективного использования кинетической энергии падающих тел в энергию разрушения, предложенный четырехрядный роторно-ударный измельчитель при той же производительности обеспечивает приготовление остроугольной колотой дроби при мощности привода около 17 кВт. При этом достигается более высокий выход готового продукта. Использование данных научных и практических исследований диссертационной работы повышает эффективность процесса приготовления колотой дроби при раскалывании дроби округлой формы. Рассчитанный суммарный средний ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения ударно-роторного измельчителя производительностью 1..1,2 т/ час для приготовления колотой остроугольной дроби за счет снижения потерь на переизмельчение на 14 %, экономии энергозатрат на выплавку 1 т стали на 27,3÷38,5 кВт/ т, и экономии материальных затрат на закупку мелющих тел составляет 1780800 руб. Срок окупаемости составляет 10,1 месяца.

Данный акт внедрения не является основанием для предъявления материальных и иных претензий связанных с авторскими правами.

Главный механик ООО «ЗСД ЛТД» \_\_\_\_\_ Дьячков А.В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»

Д.А. Вишневский  
«19» декабря 2022 г.

#### СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Акимовой Ольги Игоревны на тему «Разработка конструкции и обоснование технологических параметров роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дробы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) в учебный процесс ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»

Основные результаты диссертационной работы Акимовой О.И. на тему «Разработка конструкции и обоснование технологических параметров роторно-ударного измельчителя для производства стальной колотой дробы» внедрены в учебный процесс на факультете металлургического и машиностроительного производства:

- в качестве дополнительных разделов курса «Детали машин и основы конструирования» для обучающихся по направлениям подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» (профиль «Автоматизированные гидравлические и пневматические системы и агрегаты») и 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (профиль «Технология машиностроения»);

- в качестве дополнительных разделов курса «Детали машин» для обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» (профиль «Металлургическое оборудование»);

- при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ обучающимися, указанных выше направлений подготовки.

Соискателем разработаны физическая и математическая модели роторно-ударного измельчителя, позволяющие рассчитать кинематические и силовые характеристики агрегата, а также определить необходимые параметры привода.

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить у обучающихся уровень теоретических знаний и практических навыков и умений.

Декан факультета ММП  
к.т.н., доцент

Ю.В. Изюмов

Зав. кафедрой ПГМ  
к.т.н., доцент

В.Г. Чебан

**ПРИЛОЖЕНИЕ В****Расчет экономического эффекта результатов диссертационной работы**

УТВЕРЖДАЮ:



Зам. директора ООО

«Завод Стальной Дроби ЛТД»

Положий В.В.

**РАСЧЕТ**

**ожидаемого экономического эффекта и срока окупаемости от внедрения  
в производство колотой стальной дробы результатов научной работы  
ПАВЛИНЕНКО ОЛЬГИ ИГОРЕВНЫ**

**РАСЧЕТ ОЖИДАЕМОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА**

Колотая дробь, по сравнению с круглой обладает значительно более высокой абразивной способностью при дробеструйной обработке различных деталей машиностроительной промышленности. В этой связи данная продукция заводов стальной дробы пользуется повышенным спросом при условии приближения отпускной цены к цене круглой стальной дробы.

Применение более эффективных способов производства колотой дробы, за счет создания центрального прямого удара, обеспечивает увеличение выхода годной продукции до 14 %, а также существенное снижение расхода мелющих тел (шаров) за счет снижения их износа до 20 %

Кроме того, данная технология позволяет сократить потребление электроэнергии не только на измельчительные процессы в шаровых мельницах, но и на выплавку стали для получения исходной дробы круглой формы.

Производительность установленной на заводе шаровой мельницы составляет  $\Pi_{ш}=1,2$  т/ч дробы при установленной паспортной мощности электродвигателя  $P_{ном}=55$  кВт [1].

Удельные затраты электроэнергии на раскалывание дробы составляют:

$$\mathcal{E}_{py}=P_{ном}/\Pi_{ш}=55/1,2=45,8 \text{ кВт/т.}$$

За счет увеличения годной продукции путем снижения потерь на переизмельчение на 14 % экономия электроэнергии на 1 т. при цене электроэнергии  $C_э=3,69$  руб. составит:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = \mathcal{E}_{\text{рв}} \cdot 0,14 \cdot C_6 = 45,8 \cdot 0,14 \cdot 3,69 = 23,66 \text{ руб/т.}$$

Годовая экономия на процессы раскалывание при производстве стальной колотой дробы по усовершенствованным технологиям в количестве  $\Pi_r = 30000$  т/г составит:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = \mathcal{E}_{\text{пр}} \cdot \Pi_r = 23,66 \cdot 30000 = 709800 \text{ руб/год.}$$

Так как плавление стали осуществляется в дуговых электропечах, удельные энергозатраты которых  $\mathcal{E}_n = 195 \div 275$  кВт на 1 тонну стали [2], то экономия энергозатрат на плавку 1 т стали составит:

$$\mathcal{E}_{\text{пв}} = \mathcal{E}_n \cdot 0,14 = (195 \div 275) \cdot 0,14 = 27,3 \div 38,5 \text{ кВт/т.}$$

Годовая экономия на процессы выплавки стали, при экономии дробы на 14 % составит:

$$\mathcal{E}_{\text{пв}} = \mathcal{E}_{\text{пв}} \cdot \Pi_n = (27,3 \div 38,5) \cdot 30000 = 819000 \div 1155000 \text{ руб/год.}$$

Экономия на расходе мелющих тел при годовой их потребности и стоимости закупки  $C_{\text{мт}} = 28000$  руб/т. Расход мелющих тел составляет около  $P_{\text{мт}} = 0,5$  кг/т готовой продукции [3].

Годовая потребность в мелющих телах:

$$\Pi_{\text{мт}} = \Pi_r \cdot P_{\text{мт}} = 30000 \cdot 0,0005 = 15 \text{ т.}$$

Экономия материальных затрат на закупку мелющих тел при их экономии в 20 % составит:

$$\mathcal{E}_{\text{мт}} = \Pi_{\text{мт}} \cdot 0,20 \cdot C_{\text{мт}} = 15 \cdot 0,20 \cdot 28000 = 84000 \text{ руб.}$$

Суммарная ожидаемая годовая экономия материальных средств:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\Sigma} &= \mathcal{E}_{\text{пр}} + \mathcal{E}_{\text{пв}} + \mathcal{E}_{\text{мт}} = 709800 + (819000 \div 1155000) + 84000 = \\ &= 1612800 \div 1948800 \text{ руб.} \end{aligned}$$

### РАСЧЕТ СРОКА ОКУПАЕМОСТИ

Расчет выполнен для наиболее дорогого в реализации технологического процесса раскалывания по принципу стесненного прямого удара при условии разработки и создании специальной установки и

сопутствующей ей оборудования.

1. Необходимые инвестиционные ресурсы для реализации проекта.

Составляющие инвестиционных ресурсов:

- 1) затраты на изготовление элементов конструкций 1200000 руб.;
- 2) приобретение оборудования и комплектующих 200000 руб.;
- 3) пусконаладочные работы 100000 руб.

Составляющие расчета:

1) ожидаемый средний годовой экономический эффект от внедрения нового способа раскалывания стальной дроби:

$$E = (1612800 - 1948800) / 2 = 1780800 \text{ руб.}$$

2) затраты на изготовление элементов конструкций, приобретение оборудования и комплектующих и пусконаладочные работы 1500000 руб.

3) срок окупаемости:

$$T_{\text{окуп}} = 15000000 / 1780800 = 0,84 \text{ года (10,1 месяца)}$$

Главный экономист

Канд. техн. наук, проф. каф. ПГМ

Ассистент каф. ПГМ




С.А. Чайкина

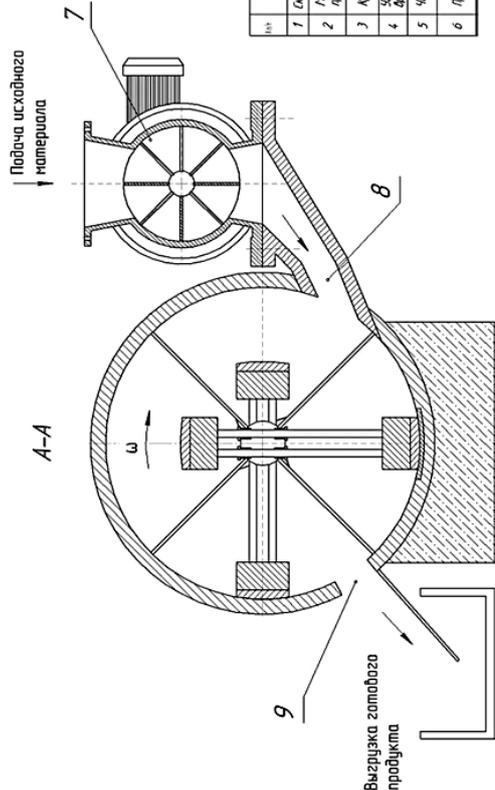
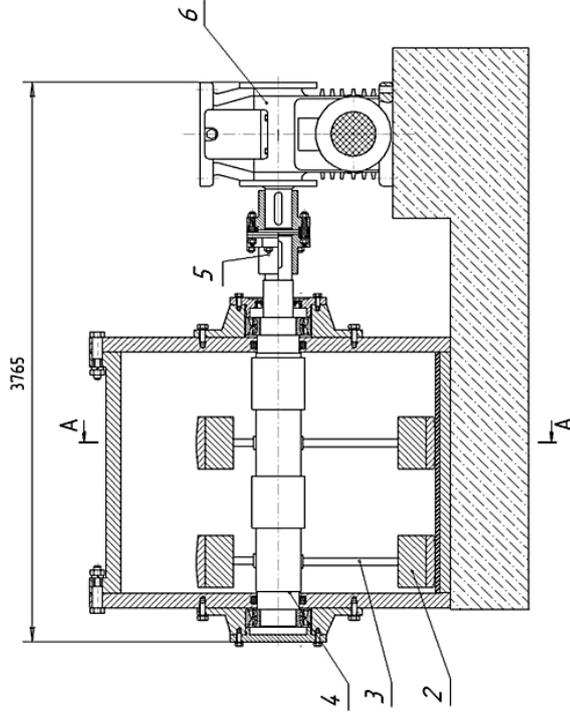
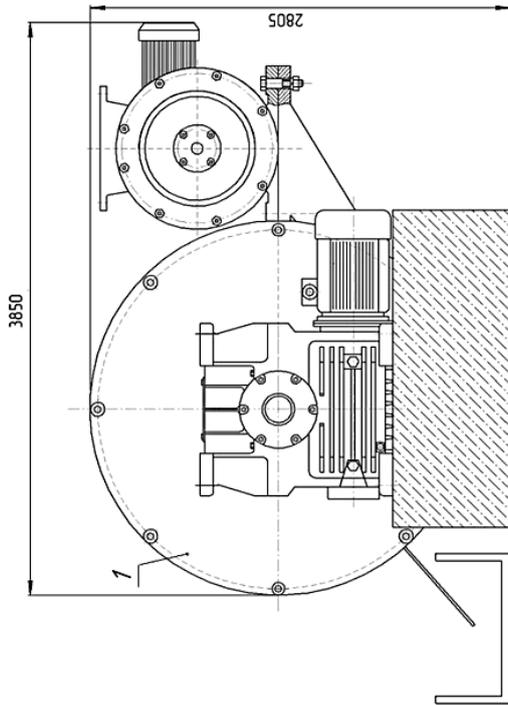
Э.П. Левченко

О.И. Павлиненко

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Конструкция и параметры роторно-ударного измельчителя

Конструктивно-технологическая схема роторно-ударного измельчителя



- 1 Корпус измельчителя
- 2 Шарнир
- 3 Шпак
- 4 Ротор
- 5 Муфта МПУЗ-50000
- 6 Мотор-редуктор МЧ-500Н
- 7 Шнековый питатель
- 8 Загрузочное окно
- 9 Разгрузочное окно

Техническая характеристика роторно-ударного измельчителя РИИ 01 (04)

Наименование параметра	Значение	
	для одной установки (01)	четыре установки (04)
1. Скорость удара молота	$V = 36,37 \text{ м/с}$	$V = 36,37 \text{ м/с}$
2. Мощность электродвигателя привода	$N = 4,3 \text{ кВт}$	$N = 17,2 \text{ кВт}$
3. Крутящий момент	$M_c = 250,1750 \text{ Нм}$	$M_c = 5000,7000 \text{ Нм}$
4. Угловая скорость вращения ротора	$\omega = 18,21 \text{ с}^{-1}$	$\omega = 18,21 \text{ с}^{-1}$
5. Частота вращения ротора	$n = 172,201 \text{ об/мин.}$	$n = 172,201 \text{ об/мин.}$
6. Производительность измельчителя	$Q = 0,25 \text{ т/ч}$	$Q = 10 \text{ т/ч}$

Техническая характеристика мотор-редуктора МЧ-500Н

Наименование параметра	Значение	
	1. Предельное число оборотов	$n = 280$
2. Мощность электродвигателя	$N = 17,2 \text{ кВт}$	
3. Крутящий момент на выходном валу	$M_c = 7590 \text{ Нм}$	
4. Частота вращения выходного вала	$n_1 = 500 \text{ об/мин}$	
5. Частота вращения выходного вала	$n_2 = 30,75 \text{ об/мин}$	
6. Коэффициент полезного действия мотор-редуктора	$\eta = 0,66$	

Исполнитель	Проверено	Утверждено
_____	_____	_____
_____	_____	_____