

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
«ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*



**ВЛАСЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ  
В МОЛОТКОВЫХ ДРОБИЛКАХ**

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

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

Алчевск – 2019

Работа выполнена в ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** **Левченко Эдуард Петрович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет», доцент кафедры «Прикладная гидромеханика»

**Официальные оппоненты:** **Еронько Сергей Петрович**  
доктор технических наук, профессор,  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», заведующий кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии»

**Фесенко Андрей Викторович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ГОУ ЛНР «ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ», заведующий кафедрой «Механизация производственных процессов в животноводстве»

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Защита состоится 06.09.2019 г. в 11<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

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

Автореферат разослан «23» июля 2019 года

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета



кандидат технических наук,  
доцент  
Смекалин Евгений Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Процессы дробления весьма распространены и встречаются практически в любой отрасли производственной деятельности. Наиболее широкое применение они находят в горнорудной промышленности при переработке полезных ископаемых, а также в химической и металлургической при производстве минеральных удобрений, красителей и многих других видов продукции, производстве строительных материалов, изготовлении керамических, силикатных, бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

При дроблении различных материалов широкое применение нашли молотковые дробилки, однако они имеют ряд недостатков. Так, наряду со значительным износом (в ряде случаев срок службы отдельных рабочих элементов составляет 72–530 часов), большая часть подводимой энергии расходуется на измельчение именно за счет истирания (до 83 %), а не удара, что приводит к излишнему росту удельных энергозатрат, достигающих 50–60 кВт·час/т.

Таким образом, исследование и обоснование конструктивно-технологических параметров процесса дробления материалов в молотковой дробилке с целью повышения производительности, снижения энергозатрат и степени износа рабочих узлов являются актуальными научно-техническими задачами металлургического производства.

**Степень разработанности проблемы исследования.** В литературе широко представлены различные конструкции молотковых и роторных дробилок и их рабочих органов, описан принцип действия, который в большинстве случаев повторяет аналогичные модели машин для дробления материалов. Значительный вклад в вопросы проектирования молотковых дробилок и разработки методов расчета технологических параметров процесса дробления внесли: А.М. Абалихин, С.Е. Андреев, М.Б. Балданов, В.П. Барабашкин, В.Я. Борщев, О.М. Брусова, В.А. Елисеев, Ф. Кик, Б.В. Клушанцев, А.Д. Линч, О.Н. Моисеев, В.А. Перов, А.А. Петров, Е.Е. Серго, П.П. Хлынин, А. Hendrix и др. Их исследования заложили научные основы описания процессов дробления материалов. Однако не уделялось достаточно внимания влиянию конструктивно-технологических параметров процесса измельчения на степень дробления и изнашивание ударных элементов в молотковых дробилках.

**Объект исследования** – технологический процесс дробления материалов в ударной дробилке и оборудование для его реализации.

**Предмет исследования** – конструкция молотка для подвеса на оси ротора ударной дробилки и основные динамические, кинематические и

технологические показатели процесса измельчения материалов при ее реализации.

**Цель исследования** – повышение эффективности процесса дробления материалов в молотковой дробилке на основе анализа и обоснования ее конструктивно-технологических параметров.

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

- анализ конструкций молотковых дробилок, их рабочих органов и особенностей реализации технологических операций дробления;

- разработка математической модели взаимодействия ударных органов с материалом на основных технологических этапах его измельчения в молотковой дробилке;

- исследование влияния условий ударного взаимодействия молотков с материалом на интенсивность их износа и степень дробления в молотковой дробилке;

- экспериментальное обоснование эффективности использования предложенной конструкции ударного рабочего органа и проверка адекватности полученных закономерностей определения технико-эксплуатационных параметров молотковой дробилки;

- разработка и внедрение в производственных условиях усовершенствованной конструкции дробилки, а также оценка экономической эффективности предложенных конструктивных решений.

#### **Научная новизна исследований:**

1. Впервые разработана математическая модель, позволяющая определить угол отклонения молотка в процессе ударного взаимодействия с дробимым куском в рабочей зоне дробилки.

2. Впервые доказано, что отношение масс молотка и дробимого куска существенно влияет на степень дробления материала свободным ударом, при этом увеличение фракции дробимого материала приводит к снижению степени дробления.

3. Впервые в условиях дробления рудных и каменных материалов свободным ударом применена математическая модель эрозионного износа для ударных органов молотковой дробилки, скорректированная с учетом распределения материала и угла его соударения с молотком при повторном контакте.

4. Установлено, что увеличение массы молотка приводит к снижению износа ударного органа при соударении с материалом, а увеличение массы куска материала – к его повышению.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** заключается в том, что на основании проведенного анализа предложена математическая модель процесса дробления материала свободным ударом в

молотковой дробилке, учитывающая, наряду с физико-механическими свойствами соударяющихся тел и геометрическими характеристиками дробильной машины, динамические и кинематические условия взаимного контакта ударного органа с кусками сырья, позволяющая определить степень дробления и износ молотков.

Выполнен анализ теоретических и эмпирических зависимостей степени дробления и износа ударного органа от массово-размерных характеристик молотка и материала.

Установлена закономерность влияния соотношения масс молотка и дробимого материала на технико-эксплуатационные характеристики процесса измельчения.

Предложенная математическая модель процесса ударного контакта позволила исследовать влияние соотношения масс молотков и куска материала на динамику их соударения, а также обосновать уменьшение угла отклонения рабочих органов с 0,03–0,2 до 0,002–0,02 рад и повышение доли полезно используемой энергии удара с 80 до 98 % при использовании различных типов ударных органов.

Обоснована конструкция нового способа подвеса молотков на оси ротора, позволяющая при дроблении материалов свободным ударом снизить износ ударных рабочих органов в 1,1–3,6 раза.

Применение молотка предложенной конструкции при фракционной подготовке агломерационных флюсов позволяет повысить степень дробления свободным ударом в 1,8–3,3 раза, фактическую степень дробления – на 6–14 %, производительность дробилки – на 12–33 %, а удельные энергозатраты снизить на 12–26 %.

**Методология и методы исследования.** Для достижения поставленных целей и задач в диссертационной работе проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований с использованием анализа и обобщения научно-технических достижений в области дробления каменных и рудных материалов, апробированных методов конечных элементов, механики сплошных сред, теории трения и изнашивания. Экспериментальные методы исследования процесса дробления включали физическое моделирование исследуемых процессов дробления при многофакторном планировании экспериментов. При обработке результатов проведенных опытов применялись методы математической статистики обработки данных.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Угол отклонения молотка в процессе ударного взаимодействия с материалом в рабочей зоне дробилки прямо пропорционален радиусу центра масс молотка, обратно пропорционален соотношению масс молотка и материала и находится в степенной зависимости от длины рабо-

чей части молотка, радиуса осей подвеса на роторе и расстояния свободного движения куска в рабочей зоне, что позволяет рассчитать степень дробления материала и износ молотков в процессе измельчения свободным ударом.

2. Степень дробления материала свободным ударом описывается нелинейной степенной зависимостью от массы молотка, соотношения масс молотка и материала и среднего диаметра куска материала, что позволяет обосновать способ подвеса молотка на оси ротора, обеспечивающий повышение производительности дробилки.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность и новизна научных и технических решений, обоснованность выводов и рекомендаций подтверждаются приведенным объемом проанализированной и систематизированной информации о процессе дробления, использованием апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью разработанных математических моделей, подтвержденной результатами опытных исследований в промышленных условиях, соответствием полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований в пределах относительной погрешности 16 %, повышением технико-экономических показателей работы дробилки с молотками новой конструкции в производственных условиях.

Основные результаты диссертации рассматривались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Машины металлургического комплекса» ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» и 6 международных научно-технических конференциях: «Молодежь и XXI век – 2016» (г. Курск, 2016 г.); «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2018 г.); «Современная металлургия нового тысячелетия» (Липецк, 2016 г.); «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (г. Трехгорный, 2017 г.); «Новые материалы и перспективные технологии» (г. Москва, 2018 г.); «Инновационные перспективы Донбасса» (г. Донецк, 2018 г.).

**Реализация результатов исследования.** Усовершенствованная конструкция дробилки прошла успешные промышленные испытания на участке подготовки шихты агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС».

Теоретические положения диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Машины металлургического комплекса» факультета металлургического и машиностроительного производства ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет».

**Публикации.** Основные положения исследования отображены в 18 печатных работах, среди них 8 статей, опубликованных в рецензиру-

емых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК ЛНР и РФ, 4 статьи в профессиональных журналах и сборниках, 6 публикаций на научных Международных и Республиканских конференциях.

**Структура диссертации** обусловлена логикой исследования, что выходит из его цели и задач. Работа состоит из введения, пяти разделов (16 подразделов), выводов к разделам, заключения, списка литературы из 152 позиций и 2 приложений. Общий объем диссертации – 176 страниц (145 страниц – основная часть).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Раздел 1 **«Состояние вопроса, цель и задачи исследования»** содержит 4 подраздела. В подразделе 1.1 **«Обоснование необходимости измельчения флюсов в металлургии»** исследовано влияние крупности флюсов на прочность и стойкость агломерата, а также обоснована целесообразность его измельчения до необходимой фракции перед введением в шихту. Подраздел 1.2 **«Анализ основных типов дробильных машин»** посвящен изучению основных способов дробления каменных и рудных материалов. В нем рассмотрены виды дробления по крупности, а также рекомендуемые для этого типы дробильных машин. Проведен анализ основных типов молотковых роторных дробилок, представлены их основные технико-эксплуатационные характеристики, выявлены основные достоинства и недостатки. Установлено, что эффективность роторных дробилок с неподвижным креплением бил на роторе выше, чем у молотковых с шарнирным подвесом молотков на оси. В подразделе 1.3 **«Анализ конструкций молотков дробилок»** рассмотрены общепринятые классификации молотков, проведен патентный анализ их конструкций. Выявлено, что повышение ресурса работы ударных элементов и эффективности процесса дробления материала в основном достигается за счет изменения конструктивных особенностей ударной части молотка. В то же время вопросы исследования способов установки на оси подвеса затронуты в работах других ученых в недостаточной степени. В подразделе 1.4 **«Обзор исследований основных процессов, протекающих при дроблении материалов»** проведен анализ гипотез, объясняющих механизмы измельчения, которые являются основой для создания различных методик прогнозирования технологических параметров процесса дробления, таких, как энергоемкость, производительность,

износ рабочих узлов и деталей. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективность процесса дробления.

Таким образом, в первом разделе отмечено, что большинство из рассмотренных методик не утратили своей актуальности. Однако не все они в достаточной мере точны и достоверны, а некоторые из них являются трудоемкими в использовании или имеют ограниченную область применения, поскольку требуют большого объема начальной информации и проведения сложных расчетов. Недостаточно изучены и обоснованы механизмы износа молотков и отсутствует методика определения степени измельчения материала при свободном ударе. Поэтому установление закономерностей для прогнозирования технологических параметров процесса дробления в молотковой дробилке является актуальной научно-практической задачей.

Во втором разделе «**Математическое моделирование молотковой дробилки**», содержащем 4 подраздела, определено направление и выбраны методы для исследования процесса дробления материалов свободным ударом. В качестве основной задачи теоретического исследования принято обоснование технологических параметров и совершенствование качественных и количественных показателей процесса дробления. Представлены аналитические зависимости, положенные в основу разработанной математической модели, и их численная реализация программными средствами для определения технологических показателей процесса дробления материала в молотковой дробилке.

В подразделе 2.1 «**Анализ стадий дробления материалов в молотковой дробилке**» исследованы основные стадии процесса дробления материала в молотковой дробилке, а также выделены основные параметры, влияющие на эффективность дробления в каждой из них.

В подразделе 2.2 «**Исследование динамики движения частицы и молотка**» получены основные закономерности определения кинематических и динамических параметров, сопровождающих процесс соударения молотка с куском материала.

Основными кинематическими параметрами, влияющими на показатели работы в процессе дробления материала в безрешетной молотковой дробилке на основных стадиях, являются скорость  $V_k$  и траектория  $T_k$  движения материала в рабочем пространстве, а также угол отклонения молотков  $\gamma_k$  от радиального положения.

Подача исходного сырья в дробилку характеризуется скоростью его передвижения по трубоконвейеру  $v_{ч1}$ , которая влияет на траекторию истечения материала и на глубину свободного движения куска в рабочей зоне молотков.

Для определения этого параметра предложена формула, полученная за счет учета в зависимости, предложенной К.Ф. Иванченко, амплитуд вертикальных  $\alpha_1$  и горизонтальных  $\alpha_2$  колебаний транспортирующего органа:

$$v_{\omega 1} = \omega_{\omega} (k_1 + k_2 \sin \beta) \sqrt{1 - T^{-2}} (\alpha_2 \cos \beta - \alpha_1 \sin \beta), \quad (1)$$

где  $\omega_{\omega}$  – угловая скорость эксцентрикового вала;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты физико-механических свойств материала;  $\beta$  – угол наклона трубоконвейера;  $T$  – коэффициент режима работы.

В этом случае глубина свободного движения куска в рабочей зоне молотков определяется по формуле:

$$c = \left( v_{\omega 1} \sin \beta + \sqrt{2gh} \right) \frac{\pi}{z\omega}, \quad (2)$$

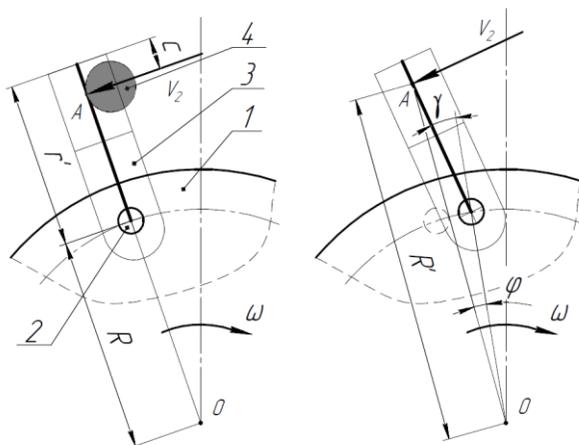
где  $h$  – расстояние от точки выгрузки материала из вибрационного питателя до рабочей зоны молотков;  $z$  – количество подвесов на роторе;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора.

Основным этапом процесса дробления свободным ударом является ударный контакт материала с молотками, при котором происходит их отклонение от радиального положения и тратится часть кинетической энергии, направленной на разрушение материала.

Для определения угла отклонения  $\gamma$  следует рассмотреть схему (Рисунок 1) и обозначить следующие параметры: соотношение масс молотка и материала  $k_m$ , радиус центра масс молотка  $r_u$ , радиус его подвеса  $R$  и длину рабочей части  $l$ .

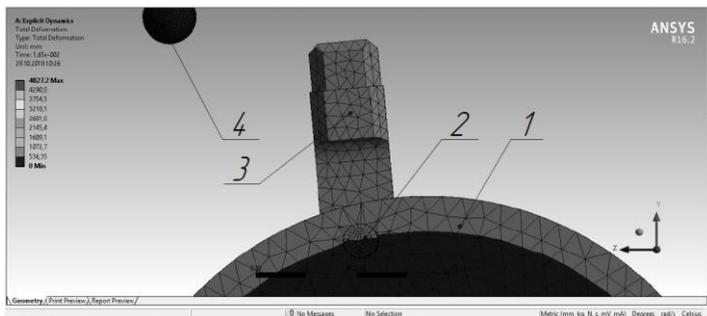
При решении дифференциального уравнения, основанного на втором законе Ньютона и статической теории удара Герца, получена зависимость угла отклонения  $\gamma$ , которая определяется следующим выражением:

$$\gamma = \left( 1 + \frac{R}{l-c} \right) \frac{4r_u}{(k_m + 1) \sqrt{(l-c)(R+l-c)}}. \quad (3)$$



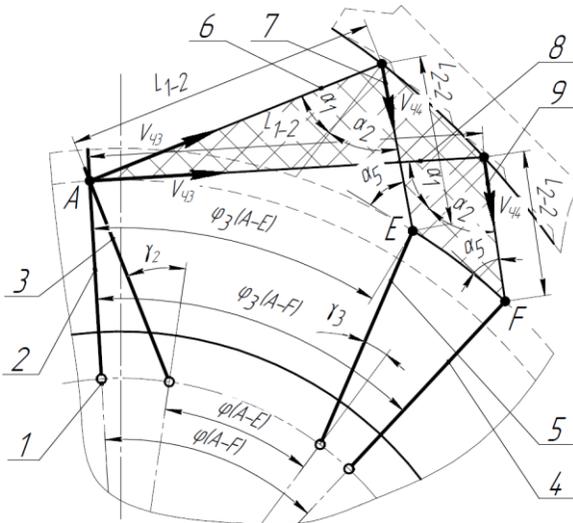
1 – ротор; 2 – ось подвеса; 3 – молоток; 4 – кусок материала  
Рисунок 1 – Схема взаимодействия молотка с материалом при их соударении

Для проверки адекватности зависимости (3) построена трехмерная модель ротора и проведено моделирование соударения молотка с материалом различной фракции в среде ANSYS Workbench (Рисунок 2). Установлено соответствие предложенной математической модели (3) на уровне 84 %.



1 – ротор; 2 – ось подвеса; 3 – молоток; 4 – кусок материала  
Рисунок 2 – Моделирование соударения молотка и куска в среде ANSYS Workbench

Для определения параметров движения частиц материала после ударного контакта с молотком на этапе соударения с отбойной плитой использовалась схема (Рисунок 3).



1 – ось подвеса; 2, 3 – положение молотка при соударении без отклонения и с наибольшим отклонением; 4, 5 – положения молотка при повторном контакте с куском; 6, 7 – векторы перемещения куска материала при наибольшем отклонении молотка; 8, 9 – векторы перемещения куска материала отклонении молотка без отклонения  
Рисунок 3 – Схема положений молотка и траекторий движения кусков материала на этапе соударении с отбойной плитой

На основании кинематического анализа получены зависимости скорости и угла соударения молотка с материалом при его повторном ударном контакте в рабочей зоне (Рисунок 4).

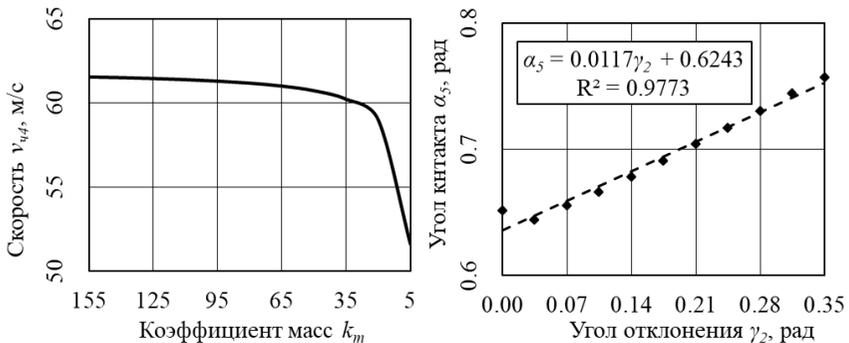


Рисунок 4 – Графики теоретических зависимостей скорости частицы и угла ее контакта с молотками при повторном внедрении в рабочую зону

С использованием полученных параметров кинематики взаимного движения молотков и материала на основании закона дробления Бонда и основных положений механики сплошных сред, в ле 2.3 «Обоснование основных критериев, влияющих на степень измельчения» сформулирована зависимость для определения степени дробления материала свободным ударом:

$$i = \frac{0,7k_{\epsilon}}{D_{cp}} \left( \omega^3 m_m \left(1 - \frac{c}{l}\right) (R+l)(R+l-c) r_u \sqrt{\frac{(l-c)(R+l-c)m_m}{E_u D_{cp}}} \right)^{\frac{2}{5}} + 1, \quad (4)$$

где  $k_{\epsilon}$  – эмпирический коэффициент;  $E_u$  – модуль упругости частицы;  $D_{cp}$  – средний диаметр частиц материала.

Из анализа зависимости (4) видно, что соотношение масс молотка и дробимого куска при определенных конструктивных характеристиках дробилки существенно влияет на степень дробления материала свободным ударом, а увеличение фракции дробимого материала приводит к ее снижению.

Подраздел 2.4 «Обоснование закономерности процесса изнашивания ударных элементов» посвящен исследованию процесса изнашивания молотков при ударном контакте с куском материала.

Для условий изнашивания молотков при дроблении материалов свободным ударом применена модель эрозионного износа I. Finnie (для углов атаки менее  $18,5^\circ$ ). Для определения износа ударных органов молотковой дробилки получена зависимость, скорректированная с учетом распределения материала и угла его соударения с молотком при повторном контакте:

$$I = \frac{k_{\sigma} M \omega \pi}{24 \sigma_m z_p} \left[ (1 - k_p) (1 - \cos(2a\gamma + 2b)) \left( R + \frac{l}{2} \frac{2kk_{\epsilon} \cos(a\gamma + b)}{k_m + 1} \right)^2 + 2\gamma^2 (k_m - 1)^2 (R + l - c)^2 \right] \quad (5)$$

где  $M$  – масса дробимого продукта;  $k_p$  – коэффициент распределения материала;  $a, b$  – параметры линейной функции угла контакта куска с молотком при повторном соударении;  $k_{\epsilon}$  – коэффициент восстановления скорости;  $k_{\sigma}$  – эмпирический коэффициент;  $\sigma_m$  – предел прочности материала молотка;  $z_p$  – количество рядов на роторе.

При численном анализе теоретической зависимости (5) установлено, что увеличение массы молотка приводит к снижению его износа, а увеличение массы куска материала – к повышению.

Третий раздел **«Выбор направлений и методов экспериментальных исследований»** содержит 5 подразделов.

В подразделе 3.1 **«Разработка и обоснование нового способа подвеса молотков на оси ротора»** обоснована усовершенствованная конструкция молотка, обеспечивающего неподвижный способ подвеса на оси ротора (Рисунок 5).

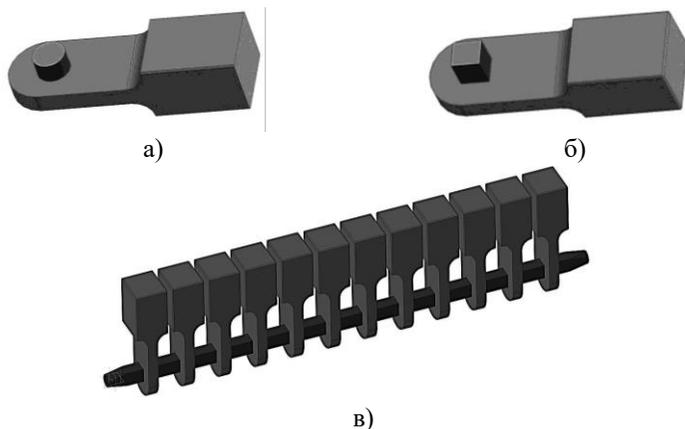


Рисунок 5 – Трехмерная модель крепления молотков на оси подвеса

Детали для проведения промышленного эксперимента изготавливались в условиях Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Рисунок 6).

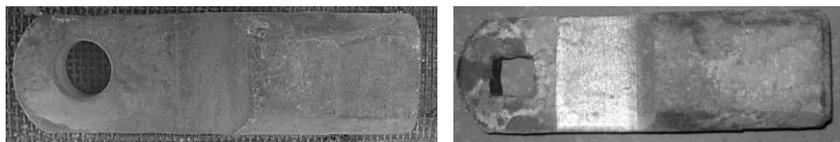


Рисунок 6 – Внешний вид молотков

В подразделе 3.2 **«Приборы, устройства и оборудование, применяемые для проведения экспериментов»** приведены технико-эксплуатационные параметры и описание приборов и оборудования, применяемых в ходе экспериментальных исследований.

При проведении экспериментальных исследований использовался дробильный комплекс в условиях агломерационного цеха Филиала

№ 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», состоящий из вибротрубоконвейера 79–ТС и молотковой дробилки без колосниковой решетки ДМРиЭ 14,5×13 (Рисунок 7 а, б), включающей в себя молотки 3, корпус 1 с отбойными 7 и поворотными 8 плитами. Молотки на осях 4 установлены в отверстиях дисков 2, которые набраны на приводном валу ротора 5.

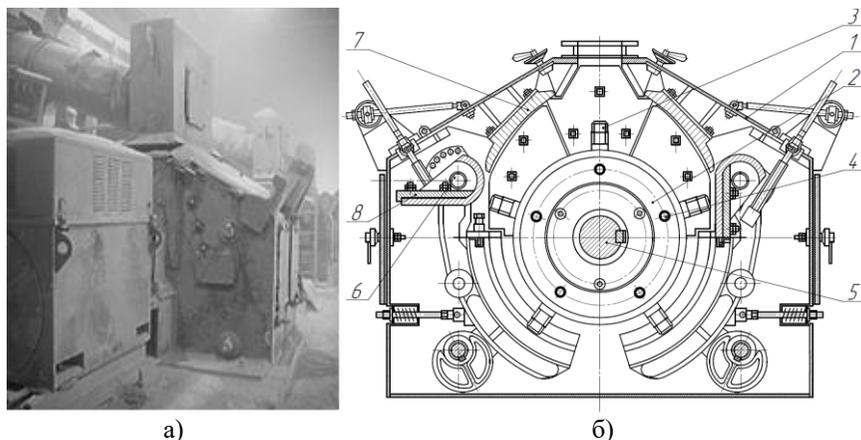


Рисунок 7 – Общий вид (а) и схема (б) дробилки ДМРиЭ 14,5×13

Для определения амплитуд колебаний вибротрубоконвейера использовался виброизмерительный прибор «АГАТ–М» с пьезоакселерометром и встроенным преобразователем (модель РА–023). Для определения массы молотков при износе и массы отдельных фракций дробленого продукта применялись весы механические ВТ–8908–100. При проведении экспериментов использовался известняк фракцией 40–80 мм.

В подразделе 3.3 «**Выбор и обоснование методов определения эксплуатационных параметров**» определены методики определения степени измельчения и износа молотка при дроблении каменных материалов и факторы, влияющие на основные показатели процесса.

Подраздел 3.4 «**Выбор и обоснование методов проведения активного многофакторного эксперимента и оценки степени достоверности экспериментальных исследований**» посвящен описанию методики проведения многофакторного эксперимента и определения достоверности полученных результатов. В работе использовалось центральное композиционное ротатбельное униформпланирование второго порядка. В качестве основных факторов выбраны: средний диаметр и масса куска материала, масса молотков.

При проведении экспериментов использовались типовые (с шарнирным креплением на оси ротора (Рисунок 5, а)) и усовершенствованные (с неподвижной установкой на оси подвеса (Рисунок 5, б, в)) молотки.

В четвертом разделе «**Экспериментальные исследования процесса дробления известняка в молотковой дробилке**» представлены результаты экспериментальных исследований процесса дробления, обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

В подразделе 4.1 «**Результаты экспериментальных исследований в промышленных условиях**» при проведении экспериментов по определению скорости движения материала по вибротрубоконвейеру получены результаты, на основании которых подтверждена (при относительной погрешности в пределах 3–9 %) достоверность зависимости (1).

Получены эмпирические зависимости степени дробления и износа молотков и проведен анализ влияния факторов на данные параметры.

В подразделе 4.2 «**Сопоставительный анализ теоретических и экспериментальных данных**» получены модели для степени дробления (6) и износа молотков (7) в натуральном виде:

$$i = 2,9 \cdot 10^{-3} D_{cp}^2 + 0,26 D_{cp} m_m - 293 D_{cp} - 8 \cdot 10^{-5} m_m^2 + 0,029 m_m + 8,7; \quad (6)$$

$$I_M = 0,74 m_q^2 - 0,025 m_q m_m + 0,92 m_q + 3 \cdot 10^{-4} m_m^2 - 0,013 m_m + 0,26. \quad (7)$$

На основании сопоставительного анализа теоретических зависимостей (4) и (5) и регрессионных моделей (6) и (7) определены эмпирические коэффициенты  $k_g = 0,0027$  и  $k_\sigma = 5,3$ .

Для оценки влияния массы молотков, диаметра и массы куски материала на степень дробления и износ молотков отображены теоретические и экспериментальные зависимости (Рисунки 8 и 9).

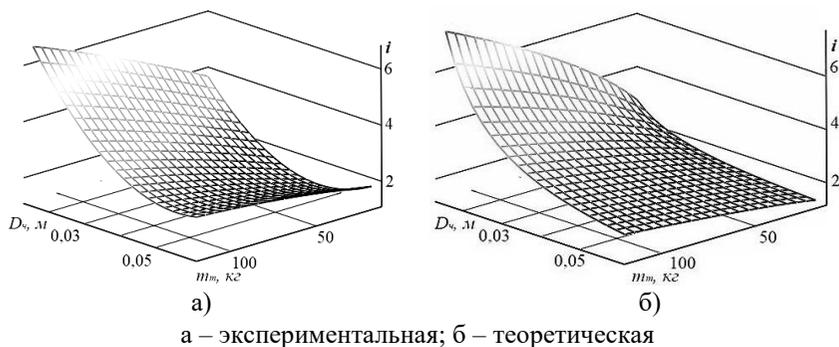
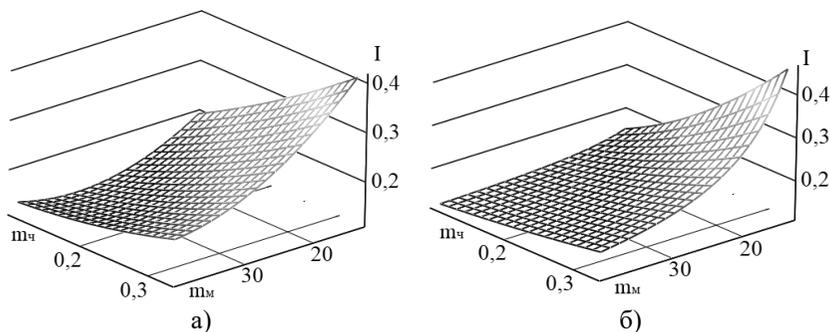


Рисунок 8 – Графики зависимостей степени дробления

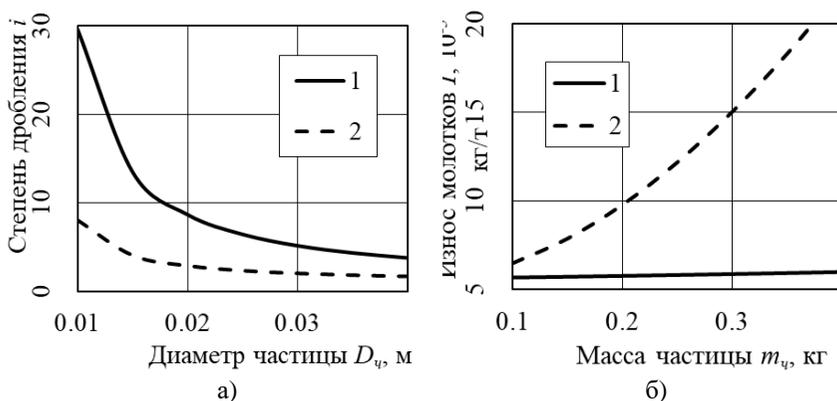


а – экспериментальная; б – теоретическая

Рисунок 9 – Графики зависимостей износа молотков

Отклонение теоретических данных от результатов экспериментальных исследований для степени дробления и износа составило 1–16 % и 3–13 % соответственно, что подтверждает достоверность предложенных теоретических методов их определения при дроблении материала свободным ударом.

Для условий эксплуатации молотковых дробилок в производстве с использованием полной навески молотков усовершенствованной конструкции (для ДМРиЭ 14,5×13 – 12 шт.) получены показатели степени дробления и износа молотков, отображенные в зависимостях (Рисунок 10).



а) степень дробления; б) износ молотков;

1 – для усовершенствованного способа подвеса; 2 – для шарнирного

Рисунок 10 – Параметры работы молотковой дробилки

Пятый раздел «Технико-экономическое обоснование результатов внедрения в производство дробилок с новыми конструктивными параметрами» содержит 2 подраздела.

В подразделе 5.1 «Сопоставление технико-экономических показателей молотковых дробилок при различных способах подвеса молотков на роторе» представлены технико-эксплуатационные показатели дробилки в штатном режиме при использовании типовой и усовершенствованной конструкции молотка (Таблицы 1 и 2).

Таблица 1 – Эксплуатационные показатели работы дробилки до (1) и после (2) внедрения усовершенствованной конструкции молотка

Тип молотков	Кол-во подаваемого материала, т/час	Содержание фракций (мм) в продукте, %			Степень дробления	Удельная производительность, т/час	Удельные энергозатраты, кВт·час/т
		5–10	3–5	0–3			
1	63,6	46,3	16,8	36,9	9,7	34,9	24,0
2	63,9	35,4	23,3	41,3	10,3	41,4	19,2

Эксплуатация дробилки ДМРиЭ 14,5×13 в штатном режиме показала, что при дроблении известняка степень измельчения выросла на 6–14 %, производительность дробилки увеличилась на 12–33 %, а удельные энергозатраты снизились на 12–26 %. Также установлено, что при использовании предложенной конструкции молотковой дробилки снизился износ молотков и распорной балки (Таблица 2).

Таблица 2 – Степень износа рабочих узлов

Наименование рабочего узла	Единица измерения	Степень износа	
		До внедрения	После внедрения
Молотки	10 <sup>-4</sup> кг/т	0,413	0,379
Распорная балка		0,078	0,042

Усовершенствованная конструкция дробилки прошла успешные промышленные испытания и внедрена на участке подготовки шихты агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС». Эксплуатация дробилки новой конструкции обеспечивает повышение удельной производительности на 16,8 %, снижение энергозатрат на 1,287 кВт на тонну известняка и годовых расходов на электроэнергию на сумму 4,651 млн руб.

Экономический эффект от внедрения, обоснованный в подразделе 5.2 «Расчет экономической эффективности применения нового спо-

**соба подвеса молотков в дробилке»,** составляет 3922,764 тыс. рос. руб. Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, необходимых для внедрения новой конструкции молотков, составляет 0,05 мес.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основе впервые установленных закономерностей и параметров процесса дробления материалов свободным ударом решена актуальная научно-техническая задача прогнозирования основных технико-эксплуатационных показателей работы молотковой дробилки, что дает возможность повысить степень дробления материала и производительность, а также снизить износ молотков и удельные энергозатраты.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Проведен анализ конструкций молотковых дробилок, их рабочих органов, особенностей реализации технологических операций дробления, выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на основные параметры процесса дробления материалов свободным ударом.

2. Установлено, что угол отклонения молотка при ударном контакте прямо пропорционален радиусу центра масс молотка, обратно пропорционален соотношению масс молотка и материала и находится в степенной зависимости от длины рабочей части молотка, радиуса осей подвеса и расстояния свободного движения куска в рабочей зоне.

3. Предложенная математическая модель процесса ударного контакта позволила исследовать влияние коэффициента масс молотков и куска материала на динамику их соударения, а также обосновать уменьшение угла отклонения рабочих органов с 0,03–0,2 до 0,002–0,02 рад и повышение доли полезно используемой энергии удара с 80 до 98 % при использовании различных типов ударных органов.

4. Установлено, что степень дробления материала свободным ударом описывается нелинейной степенной зависимостью от массы молотка, соотношения масс молотка и материала и среднего диаметра куска материала.

5. Впервые в условиях дробления рудных и каменных материалов свободным ударом применена математическая модель эрозионного износа для ударных органов молотковой дробилки, скорректированная с учетом распределения материала и угла его соударения с молотком при повторном контакте.

6. Установлено влияние соотношения масс молотка и куска материала на степень дробления материала и износ ударного рабочего органа.

7. Экспериментально обоснована конструкция нового способа подвеса молотков на оси ротора, позволяющая повысить степень дробления

свободным ударом в 1,8–3,3 раза, фактическую степень дробления – на 6–14 %, производительность – на 12–33 %, удельные энергозатраты снизить на 12–26 %, а износ ударных органов уменьшить в 1,1–3,6 раза.

8. Достоверность полученных теоретических решений подтверждена результатами экспериментальных исследований в производственных условиях. Статистическая обработка экспериментальных данных показывает, что погрешность определения степени дробления материала ударом по отношению к экспериментальным значениям составляет 1–16 %, а износа молотков – 3–13 %.

9. Результаты диссертационной работы внедрены в условиях агломерационного цеха Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС». Эксплуатация дробилки новой конструкции обеспечивает повышение удельной производительности на 16,8 %, снижение энергозатрат на 1,287 кВт на тонну известняка и годовых расходов на электроэнергию на сумму 4,651 млн руб. Экономический эффект от внедрения составляет 3922,764 тыс. руб. Срок окупаемости дополнительных капиталовложений, необходимых для внедрения усовершенствованной конструкции молотков, составляет 0,05 мес.

10. Научные результаты исследования могут послужить фундаментом для развития теории расчета технико–эксплуатационных параметров ударных дробильных машин, а также расширить при соответствующей адаптации методiku количественного сопоставительного анализа эффективности различных конструкций дробильных машин, применяемых на других предприятиях черной металлургии и в различных отраслях народного хозяйства.

### **Основные научные публикации по теме диссертационного исследования**

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

1. Власенко, Д.А. Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах: монография / Э.П. Левченко [и др.]. – Алчевск: ДонГТУ, 2016. – 225 с.

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

2. Власенко, Д.А. Структурный анализ процесса диспергирования извести в агломерационном производстве / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2015. – Вып. 44. – С. 82–86.

3. Власенко, Д.А. Особенности измельчения кусковой извести в дробилках ударного действия при различных вариантах подвеса бил / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2015. – Вып. 45. – С. 130–135.

4. Власенко, Д.А. Анализ отклонения молотков с комбинированным креплением бил в дробилках ударного действия / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, О.И. Павлиненко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2016. – Вып. 46. – С. 156–160.

5. Власенко, Д.А. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору / Д.А. Власенко, О.И. Павлиненко, Э.П. Левченко // Вестник ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – № 3 (3). – С. 21–27.

6. Власенко, Д.А. Влияние способа крепления молотков на оси ротора на скорость движения известняка к отбойной плите в ударной дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Н.А. Бондарь // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2017. – Вып. 48. – С. 180–184.

7. Власенко, Д.А. Анализ влияния режима загрузки молотковой дробилки при дроблении флюсов на производительность и степень дробления шихтовых компонентов в агломерационном производстве / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2017. – Вып. 49. – С. 114–119.

8. Власенко, Д.А. Влияние параметров подачи материала в рабочую зону молотковой дробилки на условия процесса соударения / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2017. – Вып. 51. – С. 140–144.

9. Власенко, Д.А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // Вестник ДонНТУ. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – № 3 (13). С. 8–16.

### *Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках*

10. Власенко, Д.А. Способы снижения износа молотков дробилок ударного действия / Д.А. Власенко [и др.] // Современные материалы, техника и технологии: науч.-прак. журнал – Курск: ЮЗГУ, 2016. – Вып. № 2 (5). – С.63–69.

11. Власенко, Д.А. Особенности математического моделирования механических процессов металлургических машин / Э.П. Левченко [и др.] // Современные проблемы теории машин – Норт-Чарлстон: CreateSpace: НИЦ «МашиноСтроение», 2016. – № 4 (1). – С. 14–17.

12. Пат. 179695 Российская Федерация, МПК В02С 13/16. Ротор молотковой дробилки / Д.А. Власенко, А.В. Карпов; заявитель и патенто-обладатель ФГБОУ ВПО «ЛГТУ». № 2018106733; заявл. 22.02.2018; опубл. 22.05.2018, Бюл. № 15.

*Доклады на научных конференциях и другие научные публикации*

13. Власенко, Д.А. Эффективность дробления известняка в дробилках с вращающимся ротором при реализации различных способов воздействия на материал ударом / Д.А. Власенко // «Молодежь и XXI век – 2016»: материалы Международной молодежной научной конференции – Курск: ЮЗГУ, 2016. – Том IV. – С. 94–98.

14. Власенко, Д.А. Экспериментальное определение основных параметров физического процесса удара в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко, Д.А. Вишневский // «Современная металлургия нового тысячелетия»: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 23–25 ноября 2016 г. – Липецк: ЛГТУ, 2016. – С. 254–258.

15. Власенко, Д.А. Анализ процесса загрузки и движения материала в рабочей зоне молотковой дробилки / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты»: Международная научно-исследовательская конференция. – Трёхгорный: ТТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 68–71.

16. Власенко, Д.А. Влияние степени износа молотков на эксплуатационные параметры молотковой дробилки / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // «Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов»: материалы 4-й Международной научно-практической конференции – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2018. – С. 127–129.

17. Власенко, Д.А. Влияние различных факторов на интенсивность износа молотков в ударных дробилках / Д.А. Власенко // «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства»: сб. тез. докл. III Междунар. науч.-тех. конф. / под общ. ред. Д.А. Власенко. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. – С. 36–38.

18. Власенко, Д.А. Анализ влияния отклонения молотков на скольжение материала по рабочей поверхности в процессе ударного контакта в молотковой дробилке / Д.А. Власенко, Э.П. Левченко // «Новые материалы и перспективные технологии»: сборник материалов четвертого

междисциплинарного научного форума с международным участием. – М: ООО «Буки Веди», 2018. – С. 557–560.

### АННОТАЦИЯ

**Власенко Д.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров процесса дробления материалов в молотковых дробилках.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет». – Алчевск, 2019.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по обоснованию закономерностей и разработке методик прогнозирования степени дробления материала и износа ударных элементов при дроблении каменного и рудного сырья в молотковых дробилках.

Определено влияние наиболее значимых факторов на основные технико-эксплуатационные параметры процесса дробления. Получены обобщенные формулы расчета угла отклонения молотка при ударном контакте с дробимым куском, степени дробления материала и износа ударных рабочих органов в процессе измельчения свободным ударом.

Изучено влияние соотношения масс молотков и материала, среднего диаметра кусков материала на степень дробления и износ ударных элементов.

Предложена усовершенствованная конструкция молотка, обеспечивающая жесткое крепление на оси подвеса, которое позволяет увеличить долю полезно используемой кинетической энергии, направленной на дробление материала и уменьшить угол отклонения рабочих органов в процессе соударения.

Проведено моделирование соударения молотков с куском материала в среде ANSYS Workbench и процесса дробления известняка в молотковой дробилке в промышленных условиях. Получены эмпирические зависимости степени дробления и износа молотков от массово-размерных характеристик молотка и флюсов при использовании типовой и усовершенствованной конструкций молотка. На основании сопоставительного анализа результатов экспериментальных исследований подтверждена (с высокой степенью сходимости – в пределах 1–16 %) адекватность полученных математических моделей.

Результаты исследования изложены в 18 научных статьях.

**Ключевые слова:** дробление, дробилка, молоток, конструкция молотка, ротор, ось подвеса, свободный удар, угол отклонения, степень измельчения, износ молотка, известняк, фракция.

## SUMMARY

**Vlasenko D.A. The substantiation of the structural and technological parameters of crushing materials process in the hammer crushers. - Manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences on specialty 05.02.13 – Machines, units and processes (by branches) – SEI HPE LPR «Donbass State Technical University». – Alchevsk, 2019.

The dissertation paper presents the studied results on the substantiation of regularities and the developing the methods for predicting the degree of material crushing and wear of impact elements when crushing stone and ore raw materials in hammer crushers.

The influence of the most significant factors on the main technical and operational parameters of the crushing process has been determined. The generalized formulas have been obtained for calculating the deflection angle of the hammer at impact contact with the crushable piece, the crushing degree of the material and the wear of the impact working units when crushing with a free blow.

The influence of the mass ratio of hammers and material has been studied as well as the average diameter of pieces onto the crushing degree and wear of impact elements.

The improved design of the hammer has been proposed, providing a rigid fixing to the suspension axis, which allows the increase of useful kinetic energy, aimed at crushing the material and reduce the deviation angle of the working units when impacting.

A simulation of the hammers impact with a piece of material in the ANSYS Workbench environment and the process of limestone crushing in a hammer mill in industrial conditions was carried out. Empirical dependences of the crushing degree and wear of hammers on the mass-dimensional characteristics of the hammer and fluxes using standard and improved hammer designs have been obtained. Based on a comparative analysis of experimental studies, the adequacy of the obtained mathematical models was confirmed (with a high degree of convergence – within 1–16%).

The results of the study are presented in 18 scientific articles.

**Keywords:** crushing, crusher, hammer, hammer design, rotor, suspension axle, free impact, deflection angle, grinding degree, hammer wear, limestone, fraction.