

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра машин и оборудования в агробизнесе

Направление подготовки 35.04.06 Агроинженерия

Магистерская программа: Технологии и средства механизации сельского
хозяйства

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

Тема: РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛОТКОВОЙ
ДРОБИЛКИ ЗЕРНА

Студент группы М282-02 _____ Яруллин Н.З.

Научный руководитель,

к.т.н., доцент _____

Нафиков И.Р.

Обсужден на заседании кафедры и допущен к защите

(протокол № 7 от «01» февраля 2021 г.)

Зав. кафедрой, доцент _____

Халиуллин Д.Т.

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа (Магистерская диссертация) состоит из пояснительной записки на ____ листах печатного текста, содержит ____ рисунка, ____ таблиц, список использованной литературы содержит 42 наименования.

Во введении обосновывается выбор темы и ее актуальность.

В первом разделе приводятся тенденции развития способов измельчения, анализ существующих конструкций дробилок и их рабочих органов, а также дается анализ теоретических исследований вопроса дробления. Раздел завершается целями и задачами исследования.

Во втором разделе приведена необходимость совершенствования объекта исследования, обосновывается влияние прямоугольной формы отверстий решета на качество продукта, и описывается конструкция регулятора «живого» сечения. Раздел завершается выводами.

В третьем разделе приведена программа и методика экспериментальных исследований, устройство и принцип работы модернизированной дробилки зерна, зоотехнические требования, предъявляемые к измельченным концентрированным кормам, методики определения модуля помола, определения затрат энергии на измельчение, а так же устройство, материалы и приборы применяемые в экспериментах.

В четвертом разделе приведен анализ экспериментальных исследований, где рассмотрены сравнение работы решет с круглыми отверстиями и с регулятором «живого» сечения и дана оценка энергоемкости процесса измельчения.

Пояснительная записка завершается заключением, где отражаются сущность выполненной работы, позволяющие повысить эффективность работы дробилки кормов.

ABSTRACT

The final qualification work (Master's thesis) consists of an explanatory note on ____ sheets of printed text, contains ____ figures, ____ tables, the list of references contains 42 titles.

The introduction explains the choice of the topic and its relevance.

The first section provides trends in the development of crushing methods, an analysis of existing designs of crushers and their working bodies, and an analysis of theoretical studies of the issue of crushing. The section ends with the goals and objectives of the study.

The second section shows the need to improve the object of research, justifies the influence of the rectangular shape of the sieve holes on the quality of the product, and describes the design of the "live" section regulator. The section ends with the conclusions.

The third section contains the program and methodology of experimental research, the device and principle of operation of the modernized grain crusher, zootechnical requirements for crushed concentrated feed, methods for determining the grinding module, determining the energy consumption for grinding, as well as the device, materials and devices used in experiments.

In the fourth section, an analysis of experimental studies is presented, where a comparison of the operation of sieves with round holes and with a "live" cross-section regulator is considered, and an assessment of the energy intensity of the grinding process is given.

The explanatory note ends with a conclusion, which reflects the essence of the work performed, allowing to increase the efficiency of the feed crusher.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	
1.1 Способы измельчения сыпучих кормов	
1.2 Анализ конструкций молотковых дробилок	
1.3 Влияние решета на рабочий процесс	
1.4 Анализ теоретических исследований вопроса дробления	
1.5 Цель и задачи исследования.....	
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	
2.1. Необходимость совершенствования объекта исследования	
2.2. Обоснование использования решет с прямоугольными отверстиями	
2.3. Влияние прямоугольной формы отверстий на качество продукта.....	
2.4. Описание конструкции регулятора «живого» сечения.....	
2.5. Выводы по разделу.....	
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	
3.1 Программа экспериментальных исследований	
3.2 Устройство и принцип работы модернизированной дробилки зерна	
3.3 Зоотехнические требования, предъявляемые к измельченным концентрированным кормам.....	
3.4 Устройство, материалы и приборы, применяемые в экспериментах	
3.5 Методика определения модуля помола	
3.6 Определение производительности	
3.7 Определение окружной скорости молотков.....	
3.8 Определение затрат энергии на измельчение	
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
4.1. Проведение экспериментов на лабораторной молотковой дробилке.....	
4.2. Сравнение работы решет с круглыми отверстиями и с регулятором «живого» сечения	

4.2.1. Содержание пылевидной фракции.....	
4.2.2 Содержание недоизмельченных частиц	
4.2.3 Средневзвешенное квадратическое отклонение полученного продукта ...	
4.2.4 Оценка энергоемкости процесса	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	
ПРИЛОЖЕНИЕ	

ВВЕДЕНИЕ

В России, как и во многих странах мира, фуражное зерно является одним из важнейших компонентов в рационах сельскохозяйственных животных. Доля концентратов в общем кормовом балансе России составляет 29-32%. При этом, как и в случае с любым другим кормом, значение имеет не только качество зерна, но и способ его подготовки перед скармливанием животным.

Правильность и качество приготовления кормов, в том числе и комбинированных, значительным образом сказывается на продуктивности животных, их здоровье, а в конечном итоге на качестве продукции животноводства. В связи с этим необходимо особое внимание уделять процессу подготовки зерна к скармливанию, а именно - его измельчению. Для этого в хозяйствах всех категорий широкое распространение получили молотковые дробилки. Благодаря своим преимуществам, а именно простой конструкции, малой металлоемкости, высокой энергонасыщенности, низкой стоимости, молотковые дробилки нашли широкое применение в горнорудной, цементной, кондитерской промышленности, а также во многих других отраслях народного хозяйства.

Возросшие требования к энергоэффективности, качеству, производительности невозможно удовлетворить без совершенствования конструктивно-режимных параметров измельчающих машин. Поэтому изменение рабочих органов, а также совершенствование процесса измельчения непременно скажется на качестве и себестоимости продукции.

Дробилка зерна является незаменимым инструментом в любом фермерском хозяйстве. С ее помощью можно быстро и эффективно перемолоть имеющееся сырье и приготовить разнообразный корм для животных и птиц. Однако не до конца решены вопросы связанные с энергоемкостью дробления и повышения качества получаемого продукта. В связи с этим актуальным является вопрос совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

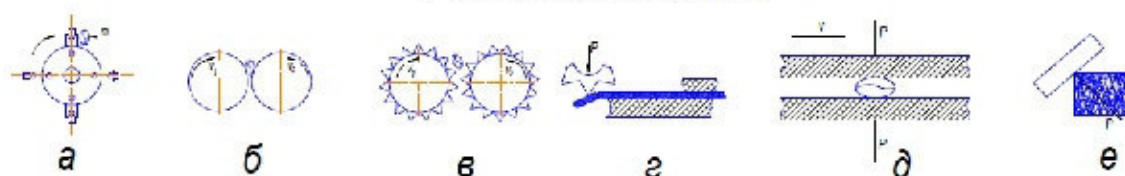
1.1 Способы измельчения сыпучих кормов

Перед введением зерна в кормовую смесь его необходимо подготовить, чтобы оно как можно больше усвоилось организмом животного. Добиваясь лучшего усвоения, снижается конверсия корма, тем самым на получение единицы продукции животноводства тратится меньше зерна. Для подготовки зерна к скармливанию в комбикормовой промышленности, а также в сельскохозяйственных предприятиях широкое распространение получил способ разрушения материала механическим воздействием со стороны рабочих органов [41].

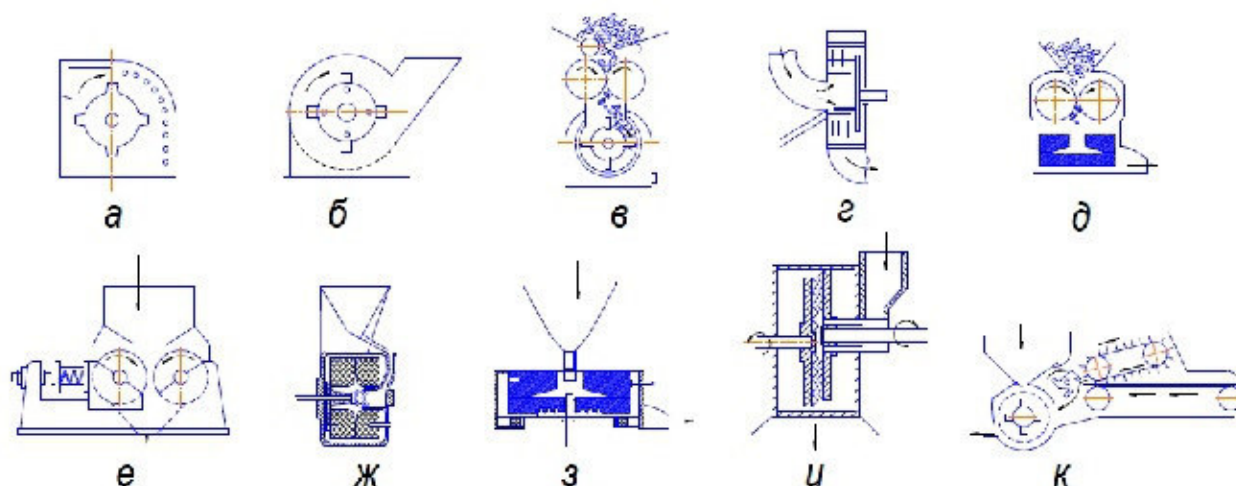
Физиологические особенности животных требуют разную степень измельчения, а зоотехнические требования к подготовленному зерновому корму предусматривают различные размеры частиц [28, 29]. В то же время измельченный материал должен иметь выравненный гранулометрический состав. Исследования проблем кормления животных показывают, что высокое содержание мелкой фракции (более 25%) в комбикорме для свиней неблагоприятно сказывается на их здоровье и продуктивности - у них может развиваться язвенная болезнь [36]. К тому же выравненный гранулометрический состав подвержен меньшему расслоению при транспортировке, а уменьшение доли мелкой фракции способствует лучшей сыпучести.

Различают несколько способов разрушения зернового материала (рисунок 1.1) [10]. При стесненном ударе разрушение происходит между двумя рабочими органами, от кинетической энергии которых зависит эффективность измельчения. При раздавливании разрушение материала происходит во всем объеме. При достижении внутреннего напряжения предела прочности, происходит разрушение зернового материала. При скалывании разрушение происходит в зонах наибольшей концентрации напряжений. При резании материал разрушается на заданные части. Этот процесс полностью поддается контролю. При истирании на материал действуют нормальные и касательные напряжения. Этот способ разрушения зерна является самым древним.

1. Способы измельчения



2. Измельчители кормового зерна



1 – способы измельчения: а – удар; б – плющение; в – сжатие-скалывание-помол; г – крошение; д – сжатие-истирание; е – резание.

2 – измельчители кормового зерна: молотковые дробилки – а – открытого, б – закрытого типа; в, г, д – двухступенчатые; е – вальцовая; ж – жерновая с горизонтальной осью; з – жерновая с вертикальной осью; и – дисковый; к – комбинированный.

Рисунок 1.1 – Схемы измельчителей кормового зерна и способы измельчения

Ни в одном из типов измельчителей приведенные способы не встречаются в «чистом» виде, тем не менее, в каждом из них можно выделить преобладающий.

Наиболее распространенным в настоящее время является способ разрушения зерна свободным ударом, где разрушение зерна происходит благодаря воздействию на него быстро движущегося рабочего органа (рисунок 1.1) [3].

Распространенность способа измельчения свободным ударом доказывают исследования многочисленных авторов, в которых говорится о том, что минимальная энергоемкость складывается именно в процессе удара [9, 21].

В своих работах Барабашкин В. П. отмечает, что удельная стоимость машин с ударным принципом действия ниже в 2 раза, а масса меньше в 4 раза по сравнению с вальцовыми машинами [10].

Кроме молотковых дробилок в кормопроизводстве используют машины, принцип работы которых основан на разрушении материала сдавливанием. К ним относят вальцовые мельницы и вальцовые плющилки [36]. Некоторые предприятия используют ударно-центробежные измельчители, к числу которых относятся центробежные дробилки, дисмембраторы, дезинтеграторы, при необходимости получения продукции тонкого помола - мельницы струйные, коллоидные и пр. [26].

Рассмотрев способы разрушения зерна, а также результаты работ по определению их энергоемкости можно сделать вывод, что выбор молотковых дробилок для измельчения зерна является обоснованным и актуальным.

1.2 Анализ конструкций молотковых дробилок

Рассмотренные ранее способы измельчения показывают, что наибольшее распространение в практике получили механические способы измельчения. Большинство немеханических способов применяются для предварительного разупрочнения материалов, т. е. образования и развития трещин, пор и других нарушений сплошности. Поэтому содержание данного подраздела ограничивается рассмотрением оборудования, реализующего механические способы измельчения, в порядке изложения способов ранее.

Измельчители, принцип действия которых основан на приложении ударных усилий к измельчаемому материалу.

Молотковые дробилки. В подавляющем большинстве имеют цилиндрический корпус с горизонтально установленным в нем ротором. На роторе шарнирно закреплены измельчающие молотки различной формы и конфигурации. Внутри корпуса по его образующей установлены шарнирно или жестко отражательные плиты. Рабочая зона дробилки в нижней разгрузочной части может быть разомкнутой или замкнутой цилиндрической просеивающей поверхностью. Просеивающая поверхность может иметь режущие грани различного исполнения, установленные перпендикулярно направлению движения молотков. В этом случае разрушение материала в нижней части дробилки осуществляется срезом. При отсутствии режущих граней материал истирается в зазоре между молотками и просеивающей

поверхностью с интенсивностью, пропорциональной уменьшению зазора. Известно выполнение просеивающей поверхности с выступами, расположенными по взаимно пересекающимся спиральям под углом $50-180^\circ$. Угол наклона выступов обеспечивает превышение результирующей силы от воздействия молотков над силами трения. Наличие выступов увеличивает на 30 % выход проходовой фракции. Интенсификация процесса достигается и за счет выполнения на рабочей поверхности деки корпуса макрорельефа в виде выступов различной конфигурации. Наиболее предпочтительной формой выступов является усеченный шаровый сегмент или конус.

Наличие ситовой поверхности, замыкающей рабочую зону, снижает надежность дробилок. Этот недостаток устранен в бесситовых дробилках с двумя соосно расположенными роторами, представляющими собой диски с молотками. Дальнейшее рассмотрение известных в молотковых дробилках конструктивных решений нецелесообразно ввиду их многочисленности, подчиненности основным решениям и специфичности, определяемой областью использования.

Применение молотковых дробилок широко известно в различных отраслях народного хозяйства: горной, строительной, химической, энергетической, пищевой, в сельском хозяйстве, в комбикормовой промышленности и т. д. Простота конструкции, надежность в работе, широкий спектр производительности, компактность, универсальность, малые габариты и металлоемкость, высокая степень измельчения делают их незаменимыми в комбикормовой и зерноперерабатывающей промышленности.

Процесс дробления — самая распространенная и очень энергоемкая операция при приготовлении кормов, обусловленная требованиями физиологией животных [1, 3, 4]. Выбор оптимальных режимов измельчения и подбор измельчающих машин является основной из задач в процессе приготовления кормов. Разработка новых энергосберегающих технологий и

технических средств позволит повысить эффективность, как отдельного фермерского хозяйства, так и сельскохозяйственного производства в целом.

Измельчающие машины применяются для улучшения однородности смесей, ускорения и повышения глубины протекания химических реакций, повышения интенсивности технологических процессов (перемешивание, сушка, обжиг, химические реакции), снижения применяемых температур и давлений (например, при варке стекла), улучшения физико-механических свойств и структуры материалов и изделий (твёрдые сплавы, бетон, керамика и др.), повышения красящей способности пигментов и красителей, активности адсорбентов и катализаторов, переработки полимерных композиций, включающих высокодисперсные наполнители (например: сажу, слюду, химические волокна и др.), переработки отходов производства, бракованных и изношенных изделий.

Эффективность работы измельчителя оценивается по производительности, качеству измельчения, удельной энергоёмкости и материалоемкости. Эти показатели в значительной мере обуславливаются их конструктивными параметрами. По размеру получаемого продукта измельчение разделяют на два типа: дробление и помол.

Классификационная схема измельчителей кормового зерна по типу рабочих органов, положению их в пространстве и способу измельчения (рисунок 1.4) позволяет выделить наиболее проблемные недостатки последних и сформировать направления энергоресурсосбережения в разработке перспективных способов измельчения и устройств для их реализации [20, 33].

На исход процесса измельчения молотковыми дробилками закрытого типа влияют: окружная скорость молотка, равная сумме разрушающей скорости и скорости циркулирующего слоя, масса циркулирующей загрузки, толщина воздушнопродуктового слоя, плотность измельчаемого продукта и механические характеристики, схемы подачи его в рабочую камеру и вывода из нее. Объем мучной фракции при этом накапливается при ударе молотков,

ударе о деки и решета, а также в процессе движения молотков в циркулирующем воздушно-продуктовом слое. Эти эффекты менее значимы в рабочем процессе вертикальных конструкций и особенно при отборе (выводе из рабочей камеры разных фракций).

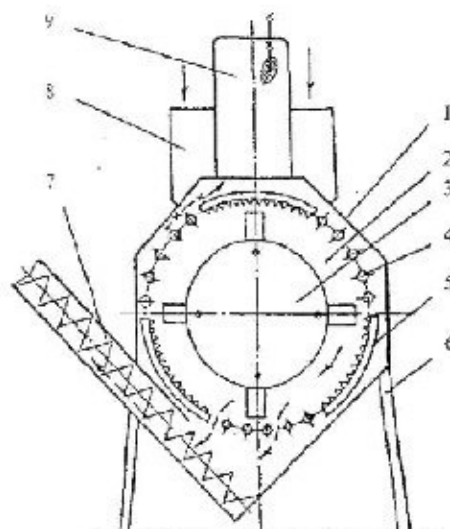


Рисунок 1.2 - Виды машин и характеристика процесса измельчения

Возрастающая потребность населения в продуктах питания обуславливает необходимость к производству малогабаритных, высокоэффективных дробилок, которые возможно использовать в фермерских и личных подсобных хозяйствах. Наибольшее распространение среди таких дробилок кормов получили дробилки ударно-истирающего действия — молотковые и роторные дробилки [2, 5].

Исследованиями, направленными на повышение эффективности рабочего процесса измельчения зерна в молотковых дробилках занимались В. Р. Алешкин, Н. Ф. Баранов, В. Л. Гейфман, В. П. Горячкин, И. В. Коношин, С. Т. Карташов, Ф. С. Кирпичников, С. В. Мельников, В. Т. Мохнаткин, В. И. Сыроватка, В. А. Сысуев и многие другие ученые [43].

Следует отметить и работы, направленные на повышение эффективности функционирования молотковых дробилок, выполненные за последнее десятилетие. В своей работе Халтурин В.С. занимался исследованием молотковой дробилки, где вместо решета используются колосники. Конструктивно-технологическая схема представлена на рисунке 1.3.



- 1 - корпус; 2 - камера дробильная; 3 - ротор молотковый; 4 - секция колосниковой решётки; 5 - дека рифленая; 6 - рама; 7 - шнек выгрузной;
8 - бункер загрузочный; 9 - фильтр для сброса избыточного давления.

Рисунок 1.3 - Конструктивно-технологическая схема дробилки с колосниковой решеткой

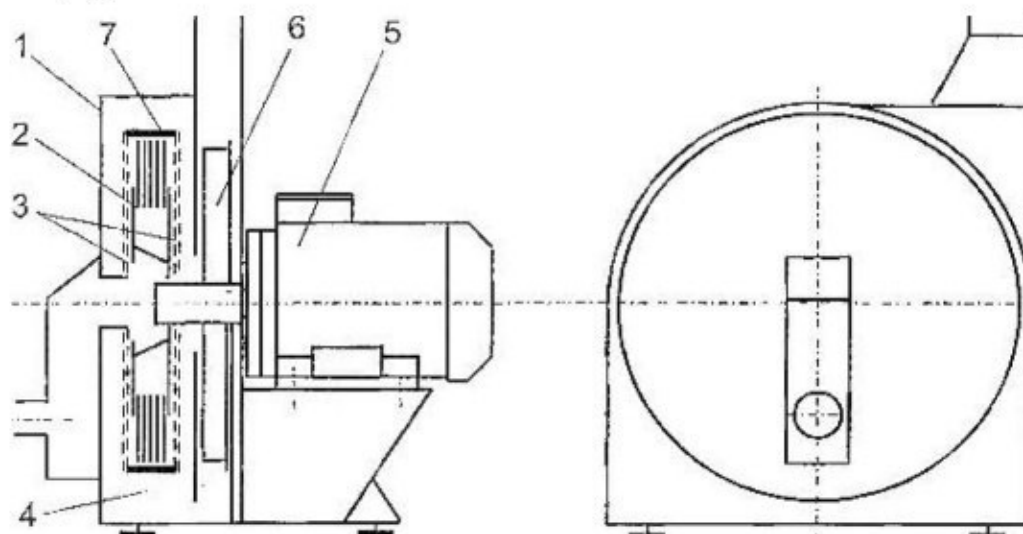
В ходе испытаний совместно с Кировской МИС было выявлено, что дробилки с колосниковой решёткой обеспечивают измельчение зерна с модулем помола соответствующим по зоотехническим требованиям для КРС (взрослых животных) и взрослой птицы, свиноматок, хряков-производителей, взрослых овец и молодняка, свиней на откорме (кроме беконного откорма). Предложенное конструктивное решение позволило снизить энергоёмкость получаемого продукта по сравнению с базовым вариантом.

В своей работе Устюгов С. Ю., проводя исследования молотковой дробилки с колосниковой решеткой, пришел к выводу, что на большинстве режимов работы содержание целых зерен в готовом продукте m_3 не соответствует зоотехническим требованиям. Максимальная пропускная способность дробилки достигается при окружной скорости $V = 85$ м/с, при этом сильно возрастают удельные энергозатраты. «Живое» сечение колосниковой решетки недостаточно для своевременной эвакуации измельчаемого продукта. Наблюдается ярко выраженное переизмельчение материала.

Кроме того, высокие окружные скорости молотков влекут за собой ускоренный износ рабочих органов и повышенные энергозатраты на холостой ход.

По результатам патентных исследований Лодыгин Д. Г. предлагает использовать дробилку зерна, у которой в торцевых поверхностях дробильной камеры установлены сепарирующие решета с регулируемыми по площади отверстиями, а по периферии молоткового ротора рифленая дека (рисунок 1.4).

Молотковая дробилка включает в себя корпус 1, внутри которого расположены молотковый ротор 2, дека 7, осадительная камера 4, регулируемые по площади отверстий сепарирующие решета 3, выполненные в виде неподвижных и подвижных решет с круглыми отверстиями диаметром 6 мм и имеющие возможность горизонтального перемещения, крыльчатка вентилятора 6, которая установлена на валу, электродвигатель 5.

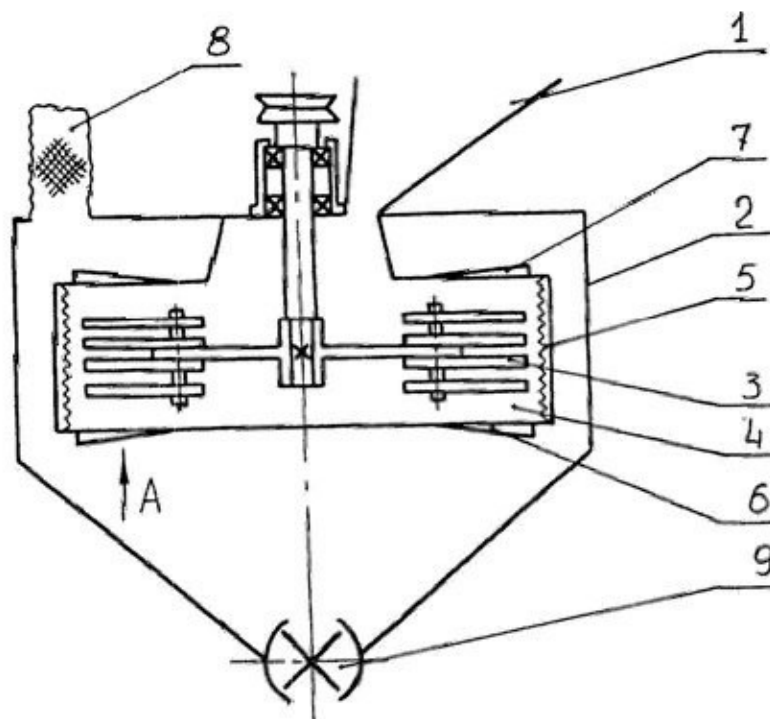


1 - корпус; 2 - молотковый ротор; 3 - сепарирующие решета; 4 - осадительная камера;
5 - электродвигатель; 6 - крыльчатка вентилятора; 7 - дека

Рисунок 1.4 - Молотковая дробилка с торцевыми сепарирующими решетками

Результаты исследований по влиянию площади отверстий на рабочий процесс дробилки показали, что изменением площади регулируемого отверстия k_s с 48 до 78 мм² можно варьировать средним размером частиц готового продукта, при этом пропускная способность Q уменьшается с уменьшением площади регулируемого отверстия. Предложенное решение позволяет снизить удельные энергозатраты по сравнению с базовым вариантом, а также уменьшить содержание целых зерен в готовом продукте.

Исследуя процесс измельчения в молотковых дробилках, Поярков М. С. предлагает использовать жалюзийную решетку. На рисунке 1.5 изображена конструктивная схема с предлагаемым решением.



- 1 - дозатор; 2 - корпус; 3 - молотковый ротор; 4 - дробильная камера;
5 - дека; 6, 7 - жалюзийная решетка; 8 - фильтр; 9 - мешкователь

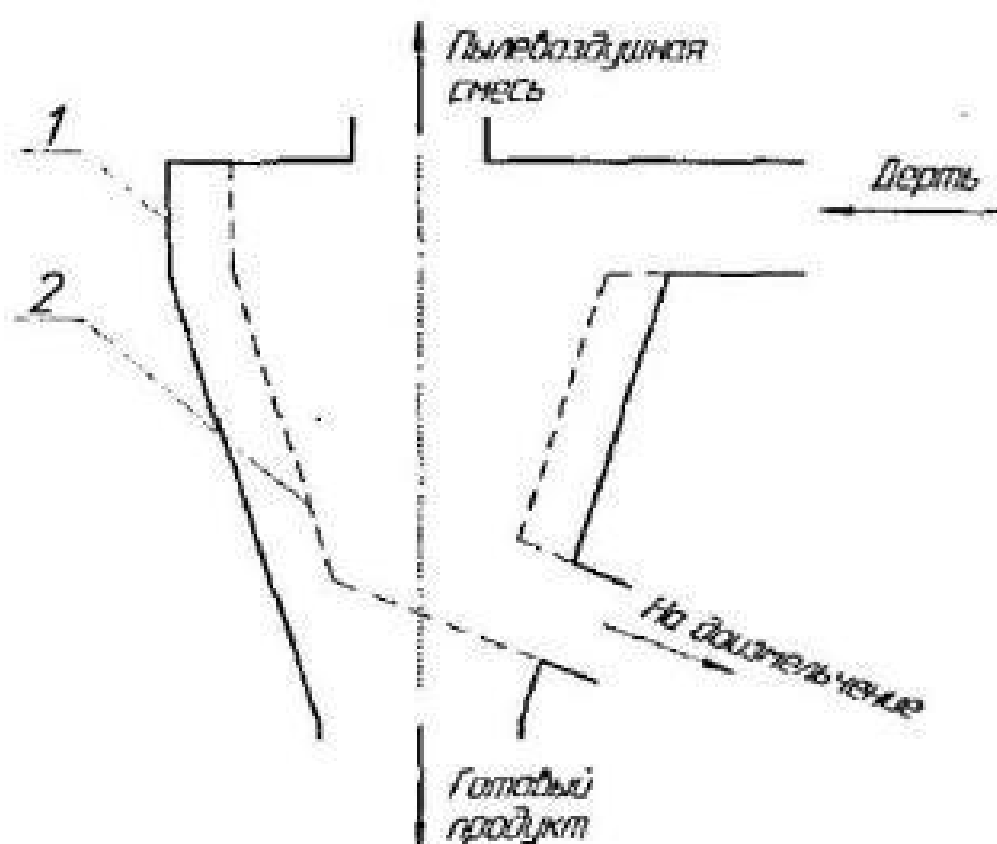
Рисунок 1.5 - Молотковая дробилка с жалюзийной решеткой

Данная дробилка работает следующим образом. Подлежащий измельчению материал подается дозатором 1 в дробильную камеру 4. Попадая на молотковый ротор 3, материал отбрасывается в направлении деки 5 и измельчается при взаимодействии с декой и молотковым ротором 3. Крупные частицы материала концентрируются вблизи деки 5, мелкие находятся во взвешенном состоянии в объеме дробильной камеры и через сепараторы 6 и 7 воздушным потоком, создаваемым вращающимся ротором, выводятся из зоны измельчения в полость корпуса 2, выполняющего функцию осадителя. Через фильтр 8 происходит удаление избыточного объема воздуха, поступающего с исходным материалом. Через мешкователь 9 готовый продукт выводится из корпуса.

При расположении жалюзийных сепараторов с двух сторон дробильной камеры и направлении движения воздушно-продуктового потока встречно створкам жалюзи наблюдается снижение энергоёмкости процесса измельчения по сравнению с решётным вариантом сепараторов при одинаковой пропускной способности и степени

измельчения материала. При этом улучшилось качество готового продукта, оцененное коэффициентом вариации размеров частиц дарты.

В своей работе Федоров О. С. предлагает повысить эффективность функционирования молотковой дробилки путем совершенствования способа сепарации. Для реализации новой технологической схемы сепарации изменена конструкция молотковой дробилки зерна типа КДУ - удалено сепарирующее решето из камеры измельчения и установлено решето новой конструкции в циклоне 1 дробилки (рисунок 1.6).



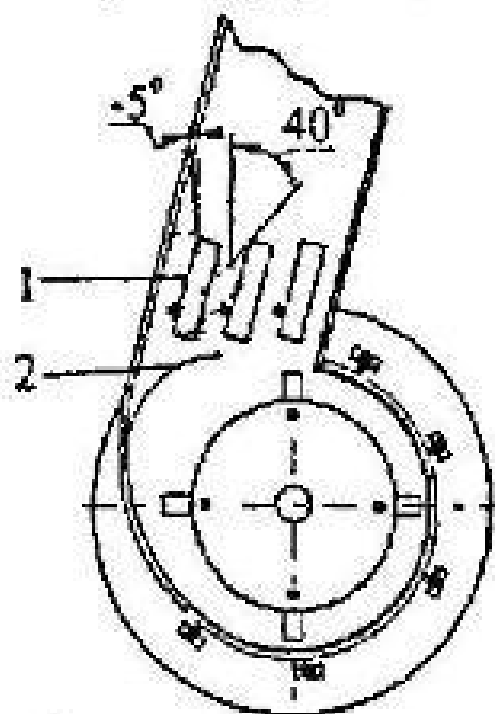
1 - циклон, 2 - решето

Рисунок 1.6 - Конструктивно-технологическая схема циклона сепаратора

В данном случае разделение измельченного материала происходит на сепарирующем решете 2. Частицы, достигшие нужного размера, проходят между стенкой циклона и сепарирующего решета и выгружаются, а недосизмельченные частицы идут на повторное измельчение.

При экспериментально установленных оптимальных конструктивно-технологических параметрах дробилки наблюдается снижение энергоемкости процесса по сравнению с базовым вариантом. При этом измельченный продукт соответствует экологическим требованиям для всех групп животных.

Повысить эффективность процесса измельчения зерна Турубанов Н. В. предлагает путем разделения дурти воздушным потоком в дробилке зерна открытого типа с пневмосепарирующим анализом. Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что изменением угла установки направляющих и положением воздушной заслонки не удается достичь требуемого качества готового продукта. Содержание целых зерен во всех опытах превышает допустимую ГОСТом величину. В связи с этим для снижения количества целых зерен в готовом продукте в дробильной камере установлено решето 2 (рисунок 1.7)



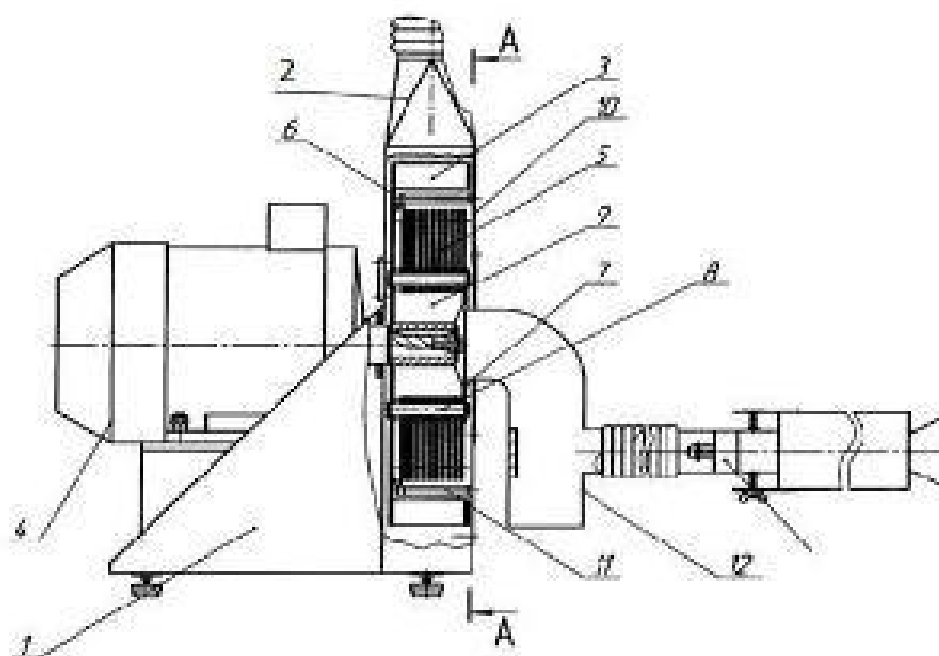
1 - направляющие, 2 - решето

Рисунок 1.7 - Конструктивное решение по заявке на патент № 2002109459

После установки решета, по результатам экспериментальных данных, можно сказать, что содержание целых зерен в получаемом продукте снизилось. Энергоемкость процесса измельчения по сравнению с базовым вариантом также уменьшилась.

Молотковая дробилка представленная на рисунке 1.8 состоит из корпуса 1, внутри которого смонтирован съемный кожух 2 наружного вентилятора 3 [9, 22, 24.].

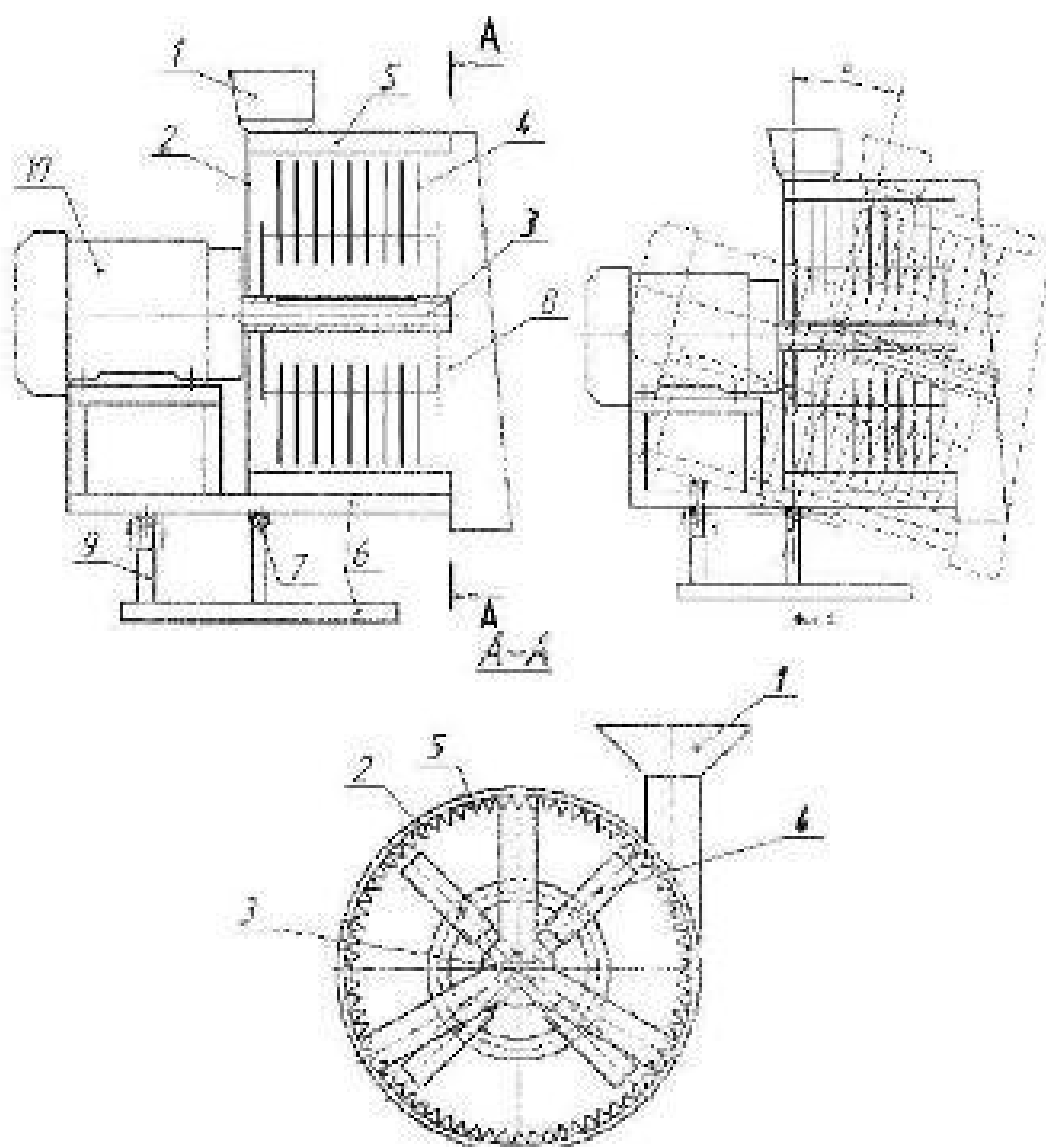
Недостатком данной конструкции является большая металло- и энергоемкость, низкая пропускная способность, большие габариты корпуса дробилки.



- 1 – корпус; 2 – кожух; 3 – наружный вентилятор; 4 – электродвигатель;
 5 – молотковый ротор; 6 – внутренний диск; 7 – наружный диск; 8 – ось;
 9 – дополнительный вентилятор; 10 – крышка; 11 – дека решето
 12 – камнеуловитель

Рисунок 1.8 – Молотковая дробилка

Молотоковая дробилка с изменяемым углом наклона (рисунок 1.9), работает следующим образом [6]. Зерно из приемного устройства 1 самотеком поступает в дробильную камеру 2, где, попадая под удары молотков 4 дробильного ротора 3, частично измельчается и отбрасывается на деку 5, при соударении с которой также происходит измельчение. Рама 6 за счет подвижного соединения 7 позволяет изменять угол наклона α молотковой дробилки относительно вертикали. Выход материала из зоны измельчения происходит через выходное отверстие 8. Устройство 9 фиксации служит для фиксации молотковой дробилки в заданном положении.



- 1 – приемное устройство; 2 – дробильная камера; 3 – ротор; 4 – молотки;
 5 – дека; 6 – рама; 7 – подвижное соединение; 8 – выходное отверстие;
 9 – устройство фиксации; 10 – электродвигатель

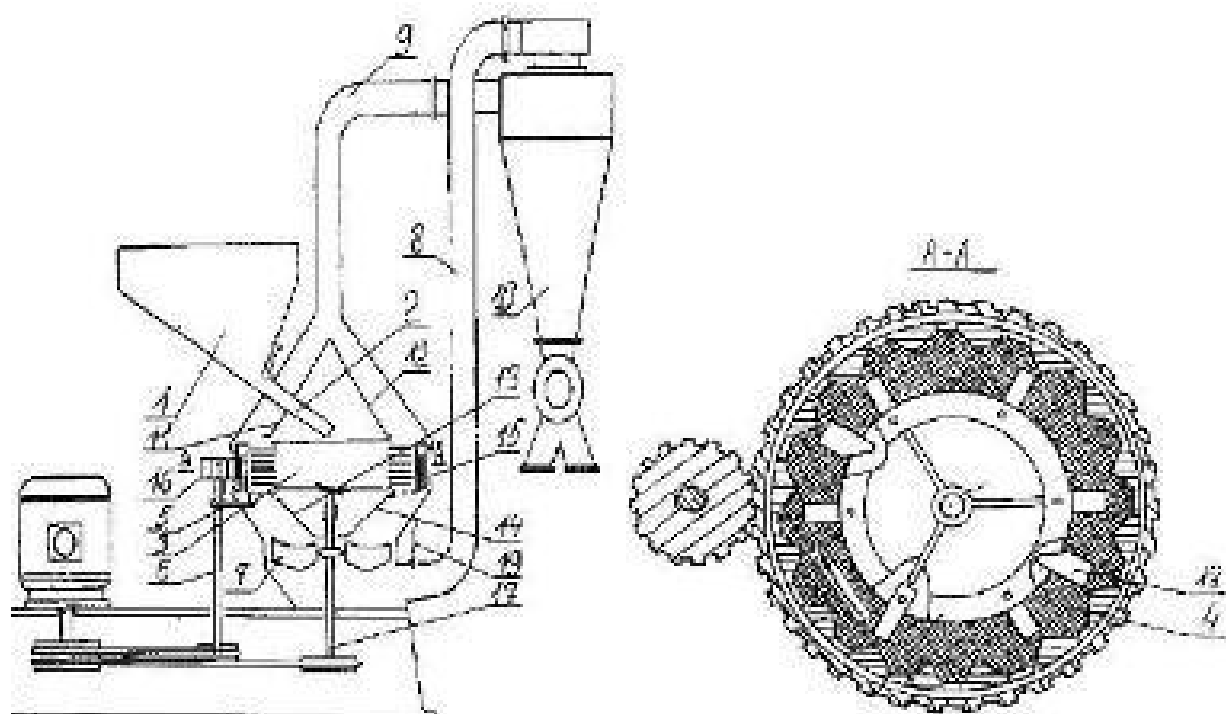
Рисунок 1.9 – Молотковая дробилка

Изменение угла наклона α молотковой дробилки относительно вертикали позволяет изменять время нахождения измельчаемого материала в дробильной камере, а следовательно, и интенсивность воздействия рабочих органов молотковой дробилки на измельчаемый материал. При уменьшении угла наклона α молотковой дробилки модуль помола увеличивается, а при увеличении угла наклона α , соответственно, уменьшается.

Недостатками этой дробилки являются низкая пропускная способность, повышенный износ деталей, а также большая энергоемкость при малой производительности.

Молотковая дробилка зерна представленная на рисунке 1.10 работает следующим образом. Поданное из бункера 1 в дробильную камеру зерно отбрасывается центробежной силой к периферии и измельчается под воздействием молотков ротора 3 и деки 15, дека 15 имеет пустотелую полость и зубчатый венец с внешней стороны, который входит в зацепления с шестерней. Вентилятор 7 отсасывает из циклона воздух, непрерывно нагнетает его в зону дробления.

Поскольку коэффициент парусности частиц измельчаемого материала увеличивается с уменьшением их размеров, то под воздействием воздушного потока более мелкие частички материала, находящиеся в дробильной камере, интенсивно выбираются из общей массы и по отводящему каналу 9 уносятся в циклон 10. Так как крупным частичкам и целым зернам соответствует более высокая критическая скорость, то они остаются в воздушно-продуктовом кольце, пока не измельчатся до более мелких размеров. Решето 4 предотвращает выпадение отдельных зерен из зоны дробления. Решето 4 имеет колебания, что улучшает просыпание измельченного материала. С поверхности решета зерно подхватывается отбойными щитками 18 ротора и вновь направляется в зону действия молотков и деки. При таком устройстве дробилки повышается производительность, и продукт получается более выровненным по фракционному составу, а его качество регулируется изменением расхода воздуха с помощью заслонки 19.



1 – бункер; 2 – приемное устройство; 3 – молотки ротора; 4 – решето;
 5 – шатун; 6 – вал; 7 – вентилятор; 8 – трубопровод; 9 – канал; 10 – циклон;
 11, 12 – направляющая; 13, 14 – барабан; 15 – дека; 16 – ведущая шестерня;
 17 – вал; 18 – щитки; 19 – заслонка

Рисунок 1.10 – Молотковая дробилка

Недостатком данной конструкции является большая металло- и энергоемкость, низкая пропускная способность, большие габариты корпуса дробилки.

На современном этапе многих исследователей интересует проблема применения измельчителей, конструктивно и технологически отличающихся от молотковых, в частности - центробежных дробилок. В основе их действия - принцип разгона зерновки при воздействии центробежных сил инерции, с ударом о преграду. Однако, большинство измельчителей характеризует низкая энерго и металлоемкость, среднее качество полученного продукта, пониженный уровень шумового воздействия и вибрации, и др. В настоящее время использование данного вида измельчителей определяется низким исследованием конструктивных параметров, а также отсутствием принятых

методик расчета параметров и режимов работы их основных рабочих органов.

Из приведенного обзора научных исследований можно сделать вывод, что работы ведутся по пути совершенствования рабочих органов молотковых дробилок с целью снижения энергоемкости процесса, а также повышения качества продукта. Однако этого недостаточно. Например, некоторые решения очень сложны в серийном производстве, что непременно сказывается на стоимости изделия. Поэтому, кроме совершенствования конструкции, необходимо совершенствовать и режим работы молотковой дробилки с целью получения качественного продукта с минимальными энергозатратами.

1.3 Влияние решета на рабочий процесс

О влиянии решета на рабочий процесс молотковых дробилок у авторов изученных работ нет единого мнения. Влияние площади поверхности решета на основные показатели процесса измельчения зерна изучали В. Р. Алешкин, С. В. Мельников, В. И. Сыроватка, А. А. Зеленев, Г. И. Шуб, И. В. Коношин, В. Н. Ткаченко, В. А. Елисеев, А. П. Махаров, И. И. Резенко и много других авторов. Большинство из них пришли к выводу, что пропускная способность дробилки возрастает с увеличением площади поверхности решета. Некоторые исследователи (В. И. Ткаченко, М. З. Рудой) считают, что для интенсификации измельчения необходимо увеличивать площадь деки за счет сокращения размеров решета.

Елисеев В. А. отмечает, что с увеличением площади решета в 3 раза пропускная способность дробилки увеличивается на 40...50%. А вероятность прохода частиц через отверстия решета зависит от скорости движения воздушно-продуктового слоя. Чем больше скорость, тем меньше пропускная способность решета. Одним из способов повышения эффективности решета является уменьшение диаметра дробильной камеры [63].

По данным увеличения угла охвата решетом с 90° до 360° при центральной загрузке и с 120° до 360° при радиальной загрузке зерна в дробильную камеру повышает пропускную способность дробилки на 20...46% и снижает энергозатраты на 19%.

В. Р. Алешкин и С. В. Мельников [4] отмечают, что пропускная способность решета определяется коэффициентом живого сечения, т.е. отношением площади

отверстий, через которые измельченный продукт покидает дробильную камеру к площади поверхности всего решета. С увеличением коэффициента живого сечения решет от 0,3 до 0,55 при измельчении различных культур удельные энергозатраты уменьшаются в среднем на 12...30% при незначительном увеличении модуля помола. Это объясняется повышением вероятности прохождения частиц через отверстия сепарирующей поверхности. Авторы публикаций [25, 35] считают, что при меньшей площади сепарирующей поверхности пропускная способность дробилок с чешуйчатыми решетками при измельчении зерна выше.

Анализ работы ситовой поверхности дробилок с горизонтальным ротором показывает, что наиболее интенсивное просеивание осуществляется в нижней части решета [29]. Для увеличения пропускной способности дробилки необходимо обеспечивать равномерный выход продукта на всей поверхности решета.

При измельчении стебельных материалов с увеличением размеров отверстий решет снижаются удельные энергозатраты, и повышается пропускная способность дробилки [11]. По мнению [25] увеличение диаметра отверстий решета с 8 до 20 мм наиболее существенно сказывается на увеличении пропускной способности дробилки по сравнению с удельными энергозатратами.

При мелком измельчении грубых кормов увеличение диаметра отверстий сита свыше 30 мм при неизменной скорости молотков не оказывает существенного влияния на дисперсность конечного продукта [45]. Энергозатраты уменьшаются на 25...50 % (в зависимости от линейной скорости молотков) при увеличении диаметра отверстий с 8 до 22 мм. Аналогичные результаты получены в работе. Авторы рекомендуют оптимальный диаметр отверстий решет 20 мм.

При измельчении зерносмеси из гороха, пшеницы, ячменя, кукурузы, овса увеличивается пропускная способность дробилки на 1,2...15,1% и снижаются удельные энергозатраты на 3,9...15,3% по сравнению с измельчением отдельных компонентов. При этом наибольший эффект достигается на решетках диаметром 5 мм [47].

В своих трудах Гиршин М. Е., Рощин П. М. отмечают, что при использовании чешуйчатого решета для измельчения листостебельной массы на молотковой дробилке агрегата АВМ-0,4 мощность рабочего хода и удельный расход энергии измельчения значительно ниже, чем при постановке решета с круглыми отверстиями [18].

Полученные экспериментальные данные автором показали, что применение

молотковой дробилки с решетом спиралевидной формы позволяет снизить общие удельные затраты энергии на измельчение в сравнении с серийной на 35%.

Из всего сказанного выше следует, что роль решета в организации процесса измельчения зерна очень высока. Анализ многочисленных научных трудов позволяет сделать вывод, что результаты исследований носят неоднозначный, а порой и противоречивый характер. В связи с этим влияние решета на рабочий процесс молотковой дробилки нуждается в дополнительном изучении.

1.4 Анализ теоретических исследований вопроса дробления

Широкое разнообразие физико-механических свойств, традиционных и вновь разработанных пищевых продуктов, необходимость получения продуктов со специфическими свойствами для новых технологий стимулировало развитие и создание многочисленных способов измельчения и аппаратов, реализующих их.

В современной практике измельчения многие способы носят научный или препаративный характер и их практическое применение определяется и будет определяться экономической целесообразностью. Актуальность такого подхода обуславливается тем, что измельчение относится к самым энергоемким и металлоемким процессам. Поэтому в сформулированном в последние десятилетия направлении по созданию ресурсо- и энергосберегающих технологий приоритет принадлежит разработке, созданию и развитию новых способов измельчения.

В работах по изучению прочности и механического разрушения зерна в машинах пищевой промышленности основной акцент направлен на разработку теории его прочности, механизм разрушения – кинетику молекулярных связей при упруго-вязких деформациях, образование и рост трещин, релаксацию напряжений в результате длительных механических деформаций сжатия, сдвига и изгиба, приводящих к постепенному заданному измельчению.

Исходя из биологических особенностей строения зерновки (рисунок 1.11), она рассматривается как комплексная конструкция, прочность которой

определяется множеством факторов – это: свойства структурных тканей оболочек и эндосперма, совокупности «конструкции» в целом и продуктов помола.

Авторы исследований обращают внимание на различные пределы прочности оболочки в целом $209,9 \text{ кгс/см}^2$ (эпикарпий, мезокарпий и пигментный слой) и эндосперма (айлероновый слой), крахмальный эндосперм и трубчатые клетки – эндокарпий – $133, \text{кгс/см}^2$. Такое строение характерно для большинства зерновок семейства мятликовых (рисунок 1.12)

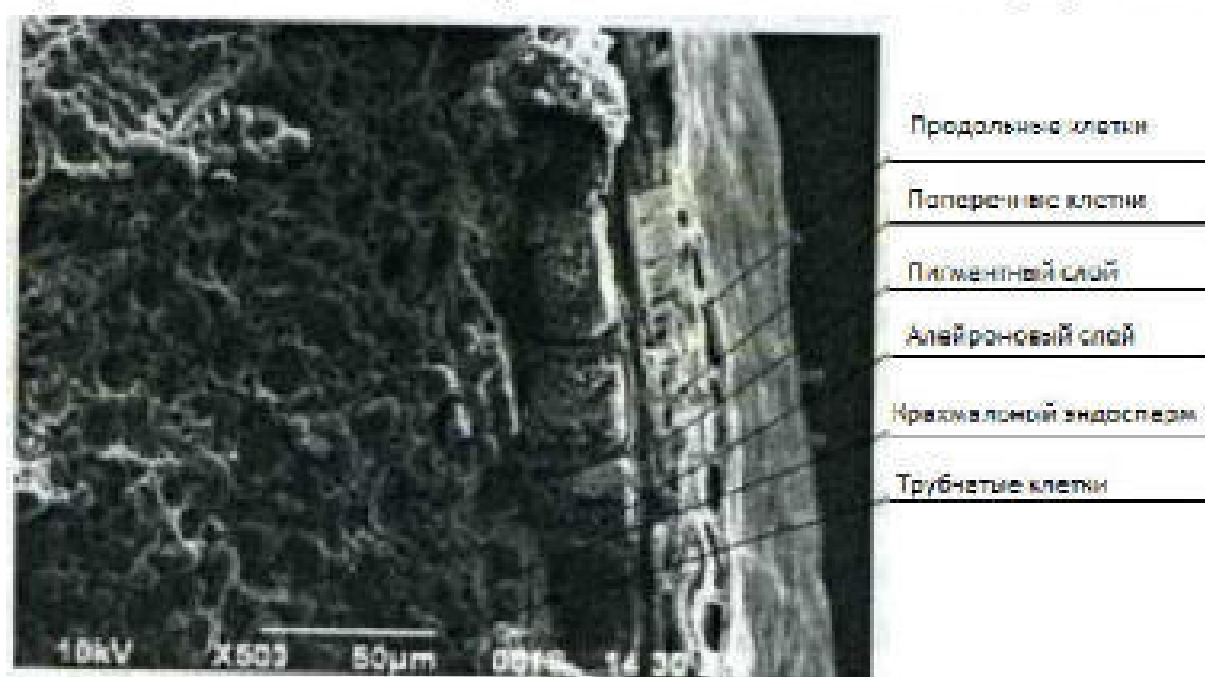


Рисунок 1.11 – Строение зерновки пшеницы

Поэтому измельчение зерновки рекомендуют производить по ее толщине, когда ее скелет занимает необходимую ориентацию относительно поверхностей рабочих органов измельчителя. При такой ориентации зерновки, бороздка способствует ее раскрытию, «разворачиванию» прочностных оболочек, высвобождая эндосперм для прямого воздействия на него рабочих органов измельчителя, росту неравновесных границ диспергирования и снижению затрат энергии на измельчение. Для описания параметров процесса авторы определяют следующие характеристики зерновок: модуль сдвига, коэффициент Пуассона, плотность совокупной структуры и коэффициент смещения, рассматривая процесс в статике без

учета влияния кинематических параметров рабочих органов на упруго-вязкие (пластические) особенности материалов растительного происхождения.



1 – твердая пшеница; 2 – мягкая пшеница; 3 – рожь; 4 – кукуруза; 5 – рис;
6 – ячмень; 7 – овёс

Рисунок 1.12– Зерновки семейства мятликовых

Следуя, в целом, объединенной теории измельчения, энергию γ разрушения целлюлозного скелета, затрачиваемую на образование новых поверхностей, предлагается определять по формуле (1.1):

$$\gamma = G K^2 \rho \ln\left(\frac{D_{cp}}{2K}\right) / 4\pi(1 - \mu), \quad (1.1)$$

в которой G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона; K – коэффициент смещения; ρ – плотность зерновки; D_{cp} – средневзвешенный размер частиц помола.

Следует отметить, что коэффициент Пуассона μ (ν), модуль продольной упругости E , модуль сдвига G , являются константами материалов с решетнокристаллической структурой, подчиняющихся закону

Гука. Применение их для описания упруго-вязких материалов растительного происхождения является допущением, требующим обоснования.

Исследованиями процессов приготовления и переработки в технологиях сельскохозяйственного производства установлены функциональные зависимости напряжений и деформаций от времени и скорости воздействия с учетом упруговязких особенностей элементов, в основу которых принят основной упрощенный закон линейного деформирования, решение которого относительно напряжения для деформации с некоторой скоростью ω имеет вид:

$$\sigma = E\omega t + n(H - E)\omega \left(1 - \frac{t}{\infty}\right), \quad (1.2)$$

где t – время нарастания деформаций – продолжительность нагружения, с, а величина $n(H - E)\omega$ представляет собой опережение напряжений по сравнению со статической величиной $E\omega t$.

Графически изменение напряжения во времени для такого режима представлено на рисунке (1.13) из которого следует, что скорость деформации оказывает влияние на величину и структуру напряжений в упруго-вязких системах.

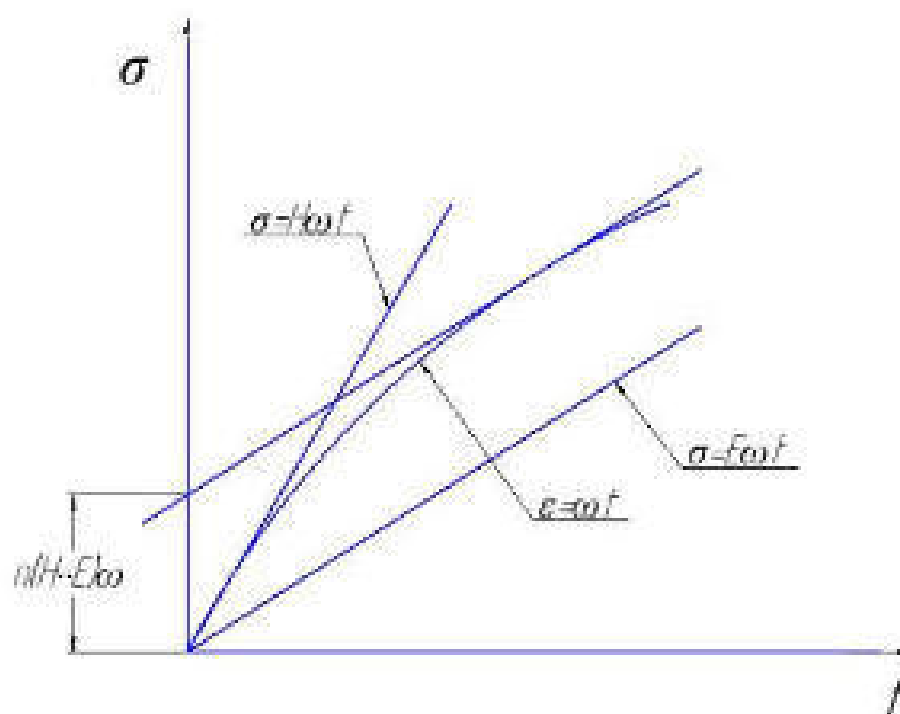


Рисунок 1.13 – График изменения напряжения в функции времени

Таким образом, длительность нахождения зерновки в рабочем пространстве измельчителей, продолжительность воздействия рабочих органов машины на исходный объект и продукты разделения на части определяют характер и энергетику процесса в целом (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики некоторых измельчителей зерна

Марка, модель	Производительность, т/ч	Мощность привода, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Линейная скорость рабочих органов, м·с ⁻¹	Время деформации зерна, с·10 ⁻⁵	Удельная Энергоемкость, кВт·ч/т	Примечания
КДМ-5	До 5	30	2940	73,5	5,5	6,0*	мелотковая
ДМВ	9-18	75-132	1500		2,6	8,33-7,33*	вертикальная
КД-2А	До 3	22	2725	68,1	4,8	7,33	90 мелотков
УФН(ГНУ ВНИИМЖ)	3-4	30	-	-	-	10-7,5	++
Ф-1М	До 2	23,1	2950	73,5	5,5	11,55	54 мелотка
КДМ-2	До 2	30	2725	68,125	4,9	15*	90 мелотков
3С25х80	До 4	18	678	8,475	180	4,5	Нарезн. валцы
3М25х80	2,0	14	430/350	5,375/4,375	220	7	Нарезн./глад. валцы
Skiold SK-3500 SK-5000	05,2-2,8-13,5	5,5-22	3000-3000	-	620-620	11-2,75*** 7,25-2,93***	дисковая
Skiold-Prof 10T	6,8-13,5	55	3000	-	620	8,08-4,07***	дисковая

* – содержание пылевидных частиц до 40%

++ – снижает содержание пылевидных частиц на 8-11%

*** – содержание частиц размером менее 1 мм – около 50%

Из данных таблицы следует, что уровень удельной энергоемкости процесса коррелирует с временным параметром и требует установления функциональной зависимости.

Результаты исследования дисковой дробилки (по патенту РФ 2511291), рабочие диски которой имеют элементы деформации и релаксации, обеспечивающие постепенное наращивание напряжений в зерновках и частицах измельчения, подтверждают перспективу энергосбережения и улучшения фракционного состава помола.

Скорость относительной деформации обеспечивается геометрическими параметрами бороздок подающего и модульного поясов дисков, частотой вращения и определяется зависимостью (1.3) :

$$\omega_{\text{ред}} = \omega_0 R_i \operatorname{tg} \alpha' / (h_n + \delta_m), \quad (1.3)$$

где ω_0 – угловая скорость диска, с^{-1} ; R_i – расстояние от оси вращения диска до произвольной точки на плоскости подающей бороздки, м; α' – угол подъема дна бороздки в аксиальном сечении, град; h_n – суммарная высота приемных конусов подвижного и неподвижного дисков; δ_m – модульный зазор между дисками.

На площадках релаксации частицы, не достигшие размеров требуемых регулировкой, деформации не подвергаются – энергия деформации накапливается в их структуре. Частицы заданных размеров, независимо от точки их отделения от частей зерновки беспрепятственно попадают в междисковое рабочее пространство под действием центробежных сил.

Однако все выше представленные разработки не решают проблемы кардинального снижения энергетизм процесса дробления и повышения качества помола. Основываясь на трудах академика В.П. Горячкина, следует предположить, что эта задача может быть решена совершенствованием технологического процесса дробления зерна. Разработкой подобной машины посвящена данная работа.

1.5 Цель и задачи исследования

Корма являются главным управляющим фактором продукционной и репродукционной функций животных и птицы. Уровень этих функций на 60...80% определяет кормление. Поскольку кормление является главной статьей расходов в животноводстве, инвестиции в совершенствование организации кормления дают большую прибыль. Самой энергоемкой операцией является измельчение концентрированных кормов. Используемые в настоящее время конструкции и способы измельчения, являются не эффективными как с технологической, так и с экономической точек зрения, что позволяет сформулировать цель исследования.

Целью настоящей работы является повышение качества дробления на основе совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи исследования:

1. На основе проведенного анализа конструкций машин для дробления зерна и их классификации, разработать схему и конструкцию дробилки зерна молоткового типа.
2. Установить рациональные конструктивные параметры и режимы работы дробилки.
3. Провести исследования процесса дробления зерна на разработанной дробилке молоткового типа в лабораторных условиях.
4. На основании экспериментальных данных получить зависимости влияния прямоугольной и круглой формы отверстий решета на качественные и энергетические показатели получаемого продукта.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Необходимость совершенствования объекта исследования

В результате модернизации отрасли кормопроизводства возрастают требования к производительности оборудования, его эффективности, стоимости. Большое внимание уделяется антропогенными факторам, вызванным нарушением технологических режимов производства кормовых компонентов [15], а также вопросам безопасности по отношению к обслуживающему персоналу и окружающей среде. К качеству получаемого корма так же выставляются все более высокие требования чем того требует ГОСТ.

Плутубное влияние целого и измельченного зерна на продуктивность и здоровье животных описано в работах многих авторов [5, 13, 30]. К тому же остаток на сите с диаметром отверстий 3 и 5 мм регламентируется ГОСТом [33, 35, 26, 28, 29, 30, 35, 37].

Проанализировав научную литературу, был сделан вывод, что содержание пылевидной фракции также снижает продуктивность и увеличивает заболеваемость и падеж животных. По данным [5] частицы тонкого помола (диаметром менее 0,2 мм), образуя конгломераты, задерживаются в рубце КРС 2-4 часа, а среднего и крупного помола 6-9 часов. Аналогичная ситуация происходит и с другими животными. Так, по данным исследований Канзасского университета (США), при скармливании пересытам ячменной дерти средним размером 0,3 мм прирост составил 750 г/сутки, в то время при скармливании дерти средним размером 0,7 мм - 950 г/сутки [17].

Попавшая в рот животных пылевидная фракция, смачиваясь слюной, образует тестообразную массу, которая забивает горло животных. Кроме того, перемельченные частицы забивают ворсинки желудка, после чего ухудшается перевариваемость корма [13].

Негативное влияние перемельченного продукта необходимо рассматривать и с технологической стороны. Тонкомельченный продукт теряется (до 5 % массы) при погрузке, разгрузке, транспортировании и при раздаче кормов, ухудшает условия труда, а в смеси с воздухом образует взрывоопасную среду. Кроме того, пылевидная фракция вызывает легочные заболевания не только у животных, но и у человека [11].

В результате анализа технологических схем серийно выпускаемых и опытно-конструкторских молотковых дробилок сделали вывод, что решетю является практически единственным рабочим органом, способным влиять на степень измельчения, а

также на качественные показатели корма (содержание пылевидной фракции, остаток на ситах с диаметром отверстий 3 и 5 мм). Замена решета, как способ изменения степени помола, снижает степень использования оборудования и увеличивает травматизм.

Кроме того, вентилятор, используемый в молотковых дробилках для эвакуации и транспортировки измельченного продукта, а в некоторых случаях и для загрузки, в силу своих конструктивных особенностей потребляет большое количество энергии.

Поэтому оптимизация конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки является актуальной задачей.

2.2. Обоснование использования решет с прямоугольными отверстиями

В роторных измельчителях ударно-стирающего принципа действия, к которым можно отнести молотковые дробилки, воздушно-продуктовая смесь движется с большими скоростями. Радиальная и осевая составляющие во много раз меньше окружной скорости, поэтому ими можно пренебречь. При рассмотрении движения частиц в дробильной камере молотковой дробилки, можно сказать, что кольцевой слой перемещается в направлении вращения ротора и со средней скоростью равной половине скорости молотков, причем скорость этого слоя у поверхности сита и деки 18-22 % от окружной скорости молотков [6, 7, 33].

В работах [14, 13, 33, 35] представлены результаты исследований лабораторных мельниц, в которых для изучения траектории движения частиц применен метод стробоскопической остановки ротора. Авторам удалось наблюдать движение частиц со скоростями, отличными от скорости молотков. Оказалось, что частицы совершают скачкообразное движение и перемещаются вдоль деки по хордам. Чем крупнее частица, тем по большей хорде она движется. Мелкие частицы, обладающие большей парусностью, при отражении от деки не достигают зоны действия молотков, а крупные частицы подвергаются многократным повторным ударам и измельчению [11]. Однако при движении частиц по поверхности решета величина хорд уменьшается и можно допустить, что максимальное количество измельчаемого материала движется равномерно по поверхности решета.

В ходе литературного обзора было выяснено, что решето, устанавливаемое в большинстве молотковых дробилок, имеет отверстия круглой формы. В ходе теоретического обоснования адекватности использования решета с прямоугольной

формой отверстий будем использовать методы, используемые в математике, физике, теоретической механике.

Рассмотрим движение частицы диаметром d через отверстие решета (рисунок 2.1). В процессе движения на нее будут действовать силы, представленные на рисунке 2.1. Результирующая всех сил $\vec{R}$ запишется в виде

$$\vec{R} = \vec{R}_A + \vec{R}_Ц + \vec{R}_C + \vec{R}_B + \vec{R}_T, \quad (2.1)$$

где R_T - сила тяжести, направленная вертикально вниз,

R_A - сила аэродинамического потока,

R_C - сила лобового сопротивления,

R_B - толкающая сила со стороны воздушно-продуктового слоя,

$R_Ц$ - центробежная сила.

Силы R_A и $R_Ц$ направлены по нормали к поверхности решета.

Силы R_C и R_B направлены перпендикулярно $R_Ц$ и расположены в плоскости вращения ротора дробилки. Приняв допущения, описанные выше, можно сказать, что действие всех сил расположено в плоскости хору.

Так как сила тяжести R_T очень мала по сравнению с другими силами, то ей можно пренебречь.

$$R_A = m \cdot k_n \cdot v_a^2, \quad (2.2)$$

где m - масса частицы,

k_n - коэффициент пористости,

v_a - скорость воздушного потока в отверстии решета.

(2.3)

где r - радиус кривизны решета,

$v_ц$ - окружная скорость частицы.

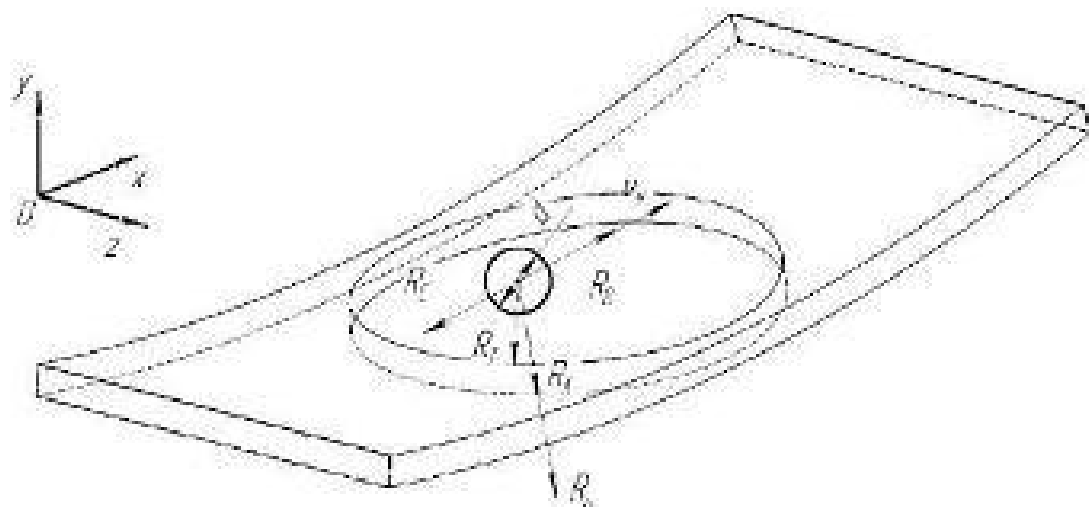


Рисунок 2.1 - Схема прохождения частицы через отверстие решета

Из источников [5, 7] можно принять:

$$v_{\text{ч}} = 0,2 \cdot v_{\text{м}}, \quad (2.4)$$

где $v_{\text{м}}$ - скружная скорость молотков. Так как движение частицы по поверхности решета равномерное, то:

$$\vec{R}_c \cdot \vec{R}_s = 0,$$

$$R = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^2}{6} \cdot \left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_{\text{ч}}^2}{r} \right), \quad (2.5)$$

$$(2.6)$$

где ρ - плотность частицы,

d - диаметр частицы.

Для того чтобы частица гарантированно покинула дробильную камеру, она должна за некоторое время Δt погрузиться в отверстие решета на некоторое расстояние Δs [38].

$$\Delta s = \frac{R \cdot \Delta t^2}{2 \cdot m}, \quad (2.7)$$

Время Δt из выражения 2.7 с учетом выражения 2.6 запишем в виде:

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_{\text{ч}}^2}{r}}}$$

За время Δt частица преодолит расстояние AB (рисунок 2.2) (2.8)

$$\Delta t = \frac{AB}{v_{\text{ч}}},$$

$$(2.9)$$

Приравняв выражения 2.8 и 2.9 получим:

$$\frac{AB}{v_{\text{ч}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_{\text{ч}}^2}{r}}}$$

$$(2.10)$$

$$AB = v_q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta s}{k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r}}}$$

В своих работах параметр Δs связывают прямой функциональной (2.11) зависимостью с диаметром частицы d , т.е.:

$$\Delta s = f(d).$$

Представляя выражение 2.12 в 2.11 получим (2.13)

$$f(d) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{AB}{v_q} \right)^2 \cdot \left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r} \right). \quad (2.13)$$

Проанализировав уравнение 2.13, можно сказать, что продольный размер отверстия (отрезок AB на рисунке 2.2) будет влиять на размер частиц, способных пройти через отверстие решета.

В решетках с круглыми отверстиями отрезок AB будет представлять собой хорду, проведенную в плоскости вращения ротора. В центральной части отверстия этот отрезок максимален и равен диаметру отверстия. В этой части будут проходить как крупные частицы, так и пылевидная фракция. К краям отрезок AB уменьшается до нулевого значения. Тем самым можно выделить зону, где будет проходить только пылевидная фракция. Поэтому круглая форма отверстий решета способствует как прохождению крупных частиц, а иногда и целых зерен, так и образованию пылевидной фракции.

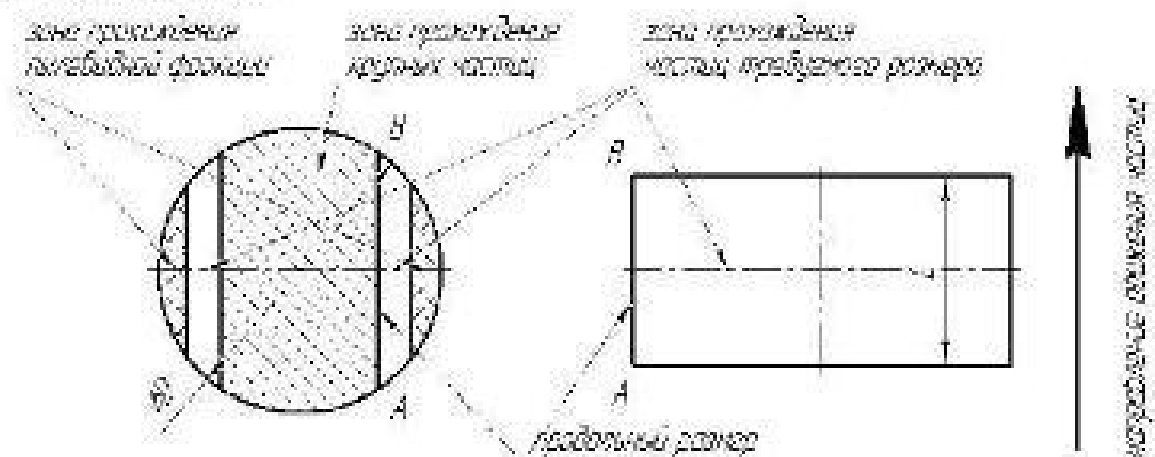


Рисунок 2.2 – Обоснование использования решета с прямоугольными отверстиями

В отличие от круглых, в прямоугольных отверстиях продольный размер постоянен, поэтому создаются условия для образования материала, имеющего более выравненный гранулометрический состав, с меньшим содержанием пылевидной

фракции и целых зерен

2.3. Влияние прямоугольной формы отверстий на качество продукта

При нахождении зависимости диаметра частиц d , способных покинуть дробильную камеру, от продольного размера AB отверстия решета примем во внимание тот факт, что частицы в дробильной камере движутся по поверхности решета рыхлым слоем и вероятность попасть в отверстие у этих частиц одинакова [42]. Рассматривая прохождение частицы 1 через отверстия решета с радиусом кривизны r (рисунок 2.3) в сечении, совпадающим с плоскостью вращения ротора, граничным условием прохождения частицы 1 диаметром d возле кромки A примем положение, при котором траектория движения ее центра масс будет направлена на кромку B (частица 2)

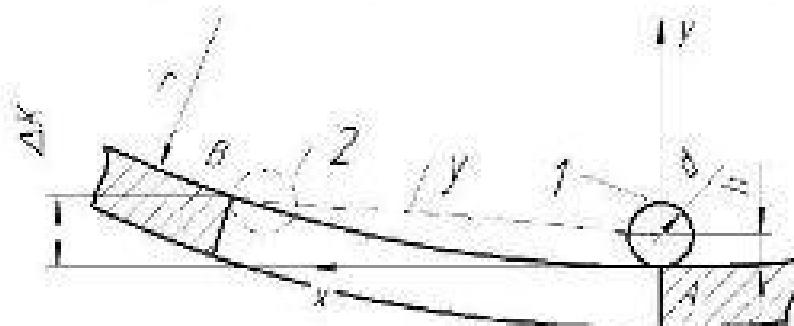


Рисунок 2.3 - Прохождение частицы через отверстие решета. Рассмотрим прохождение частицы I через отверстие с продольным размером решета AB и радиусом кривизны r (рисунок 2.3).

Записишем наравенство, при соблюдении которого произойдет эвакуация
Боготинны.

$\Delta K \geq \gamma.$

где y – координата движения центра тяжести частицы I. (2.14)

$$\Delta K \approx r - \sqrt{r^2 - AB^2}.$$

Для нахождения уравнения движения центра тяжести y воспользуемся (2.15) системой уравнений

$$\begin{cases} y = h \frac{R \cdot \Delta t^2}{2 \cdot m} \\ x = v_q \cdot \Delta t \end{cases} \quad (2.16)$$

где η – начальная координата центра тяжести частицы 1

Выразив Δl через x получим:

$$y = h - \frac{R \cdot x^2}{2 \cdot m \cdot v_q^2} \quad (2.17)$$

Выразив величину R через уравнение 2.6 и переписав формулу 2.17, получим:

$$y = h - \frac{\left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_a^2}{r}\right) \cdot x^2}{2 \cdot v_q^2} \quad (2.18)$$

Окончательное неравенство 2.14 примет вид

$$r - \sqrt{r^2 - AB^2} \geq h - \frac{\left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_a^2}{r}\right) \cdot x^2}{2 \cdot v_q^2} \quad (2.19)$$

Рассмотрим, как влияет форма отверстий на максимальный размер частиц d_{max} , способных пройти через отверстие решета. Выразив величину h как $\frac{d_{max}}{2}$, получим выражение, описывающее зависимость размера частиц, способных покинуть дробильную камеру, от продольного размера частиц, способных покинуть дробильную камеру, от продольного размера отверстия:

$$d_{max} \leq \frac{\left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_a^2}{r}\right) \cdot AB^2}{v_q^2} + 2 \cdot \left(r - \sqrt{r^2 - AB^2}\right) \quad (2.20)$$

В решетках с прямоугольной формой отверстий параметр AB постоянен и равен L , а с круглой – меняется от 0 до D и описывается уравнением:

$$AB = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - Z^2} \quad (2.21)$$

где D – диаметр круглого отверстия, Z – расстояние от центра отверстия до центра тяжести частицы по оси z .

Полагая, что в дробильной камере полидисперсный материал движется рыхлым слоем и вероятность попадания частиц в створ отверстия одинакова получим, что в решетках с круглыми отверстиями в центральной части будут проходить как крупные частицы, так и мелкие, в то время как у края будут эвакуироваться только мелкие частицы. Прямоугольная форма инвариантна, и по всей ширине отверстия созданы одинаковые условия для эвакуации частиц. Поэтому условием нахождения необходимого продольного размера L прямоугольного отверстия является получение дельты одинакового модуля помыла как на решетках с прямоугольной, так и с круглой

формой отверстий (рисунок 2.4).

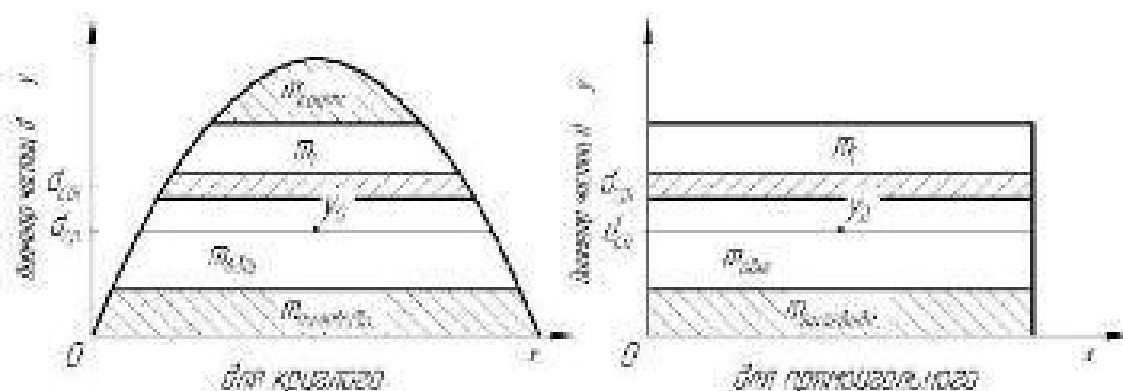


Рисунок 2.4 - Зависимости максимального диаметра частиц, способных покинуть дробильную камеру

Условием нахождения значения L эквивалентному диаметру круглого отверстия D является равенство координат центра тяжести фигур, массой $m_{\text{фиг}}$, описываемых обеими графиками. Координата y_0 фигуры, описываемой графиком и есть модуль помола. Если найдем из выражения

$$y_0 = \frac{1}{2} \frac{\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} d_{\text{max}}^2 dx}{\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} d_{\text{max}} dx} \quad (2.12)$$

Проведя вычисления при помощи прикладной программы MathCad 14 получим, что при одинаковых условиях работы молотковой дробилки, с целью получения одинакового модуля помола, продольный размер L прямоугольного отверстия необходимо принять на 10,6 % меньшим чем диаметр круглого отверстия D .

Приняв допущения, описанные выше, а также задавшись начальными условиями, построим график распределения диаметра частиц для круглого и прямоугольного отверстий (рисунок 2.5). Для этого найдем процентное соотношение каждого класса R_i из уравнения

$$R_i = \frac{m_i}{m_{\text{общ}}}, \quad (2.13)$$

Где m_i – i -го класса, $m_{\text{общ}}$ – масса навески.

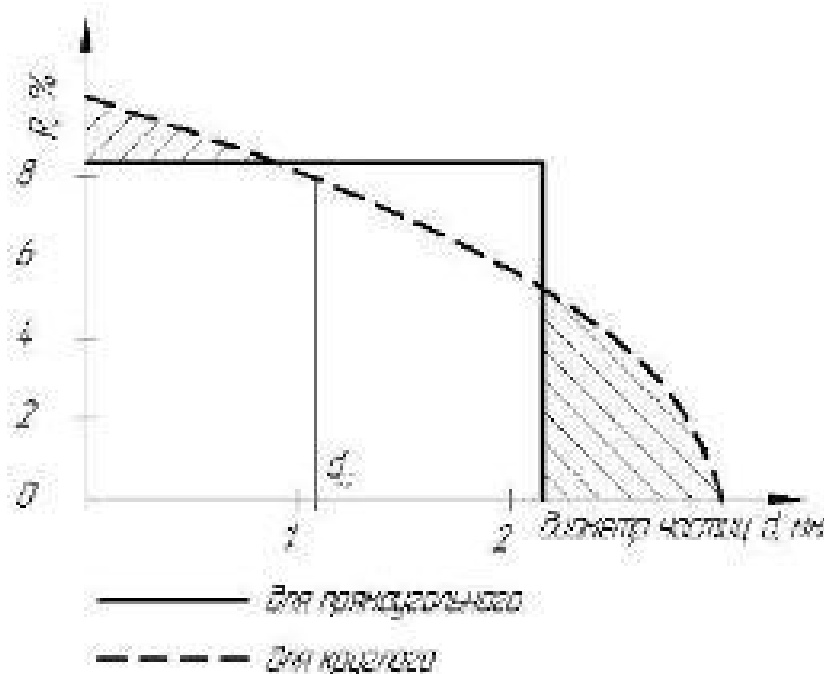


Рисунок 2.5 - Теоретическое распределение гранулометрического состава

Используя интегральное исчисление, получим:

$$R_i = \frac{\int_{d_{cp_i}^{min}}^{d_{cp_i}^{max}} d_{max}^{inv} dy}{\int_0^{d_{max}} d_{max}^{inv} dy'} \quad (2.24)$$

где $d_{cp_i}^{min}$ и $d_{cp_i}^{max}$ – минимальный и максимальный диаметр частиц в i -том классе,

d_{max} – максимальный диаметр частиц,

d_{max}^{inv} – функция обратная d_{max} .

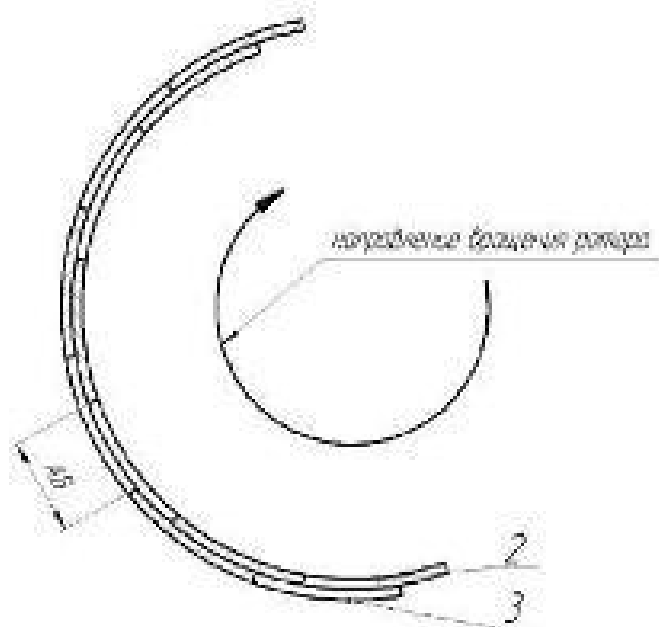
Из графика на рисунке 2.5 видно, что гранулометрический состав продукта, получаемого при использовании решет с отверстиями прямоугольной формы, имеет меньшее содержание пылевидной фракции и крупных частиц. Это позволяет нам утверждать, что получаемая дёрть имеет лучшее качество.

2.4. Описание конструкции регулятора «живого» сечения

Как было отмечено ранее, возросшие требования со стороны производителей кормов для животных требуют от машиностроителей производства таких молотковых дробилок, где время, затрачиваемое на изменение степени измельчения, было бы минимальным.

Для решения этой задачи предложено использовать регулятор «животоз» сечения (рисунок 2 б), выполненный в виде неподвижного решета 2 и подвижного 3, с возможностью перемещения по окружности до обильной камеры.

Перемещение подвижного решета 3 на требуемое расстояние относительно неподвижного 2 необходимо осуществлять вокруг дробильной камеры в направлении вращения ротора (рисунк 2.6). В противном случае произойдет набивание материала в отверстия решет, как следствие уменьшится производительность и ухудшится гранулометрический состав.



1 - неподвижное решето; 2 - подвижное решето

Рисунок 2.6 - Схема перемещения решета

Перемещение решета 3 повлечет за собой изменение продольного размера «живого» сечения АВ, как следствие изменится средний размер частиц получаемого продукта. Использование предложенного конструктивного решения позволит бесступенчато изменять степень измельчения непосредственно в процессе работы молотковой дробилки, что позволит не останавливать технологическую линию. Кроме того, вместо комплекта решет необходимо использовать два решета.

На основании теоретического обоснования можно утверждать, что за

счет отверстий прямоугольной формы получаемый продукт будет иметь более выравненный гранулометрический состав с меньшим содержанием пылевидной фракции и крупных частиц по сравнению с отверстиями круглой формы. Ожидается увеличение производительности и снижение энергоемкости процесса измельчения по сравнению с серийно выпускаемой молотковой дробилкой.

2.5. Выводы по разделу

1. Теоретический анализ использования решета с прямоугольной формой отверстия выявил широкие возможности по улучшению качества продукта, уменьшению пылевидной фракции, снижению содержания целых и неизмельченных зерен, а также снижению энергоемкости процесса измельчения.

2. С целью улучшения эксплуатационных характеристик молотковой дробилки и повышения ее коэффициента использования предложено использовать регулятор «живого» сечения, позволяющий при использовании двух решет бесступенчато регулировать степень измельчения и получать продукт с заданным модулем помола.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Программа экспериментальных исследований

В соответствии с поставленными целями и задачами исследования разработана программа экспериментальных исследований, которая включает:

1. Разработка конструктивно-технологической схемы экспериментальной молотковой дробилки;
2. Подбор устройств, материалов и приборов, применяемых в экспериментах;
3. Выполнение экспериментальных исследований;
4. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров дробилки зерна на качественные-количественные показатели процесса измельчения.

3.2 Устройство и принцип работы модернизированной дробилки зерна

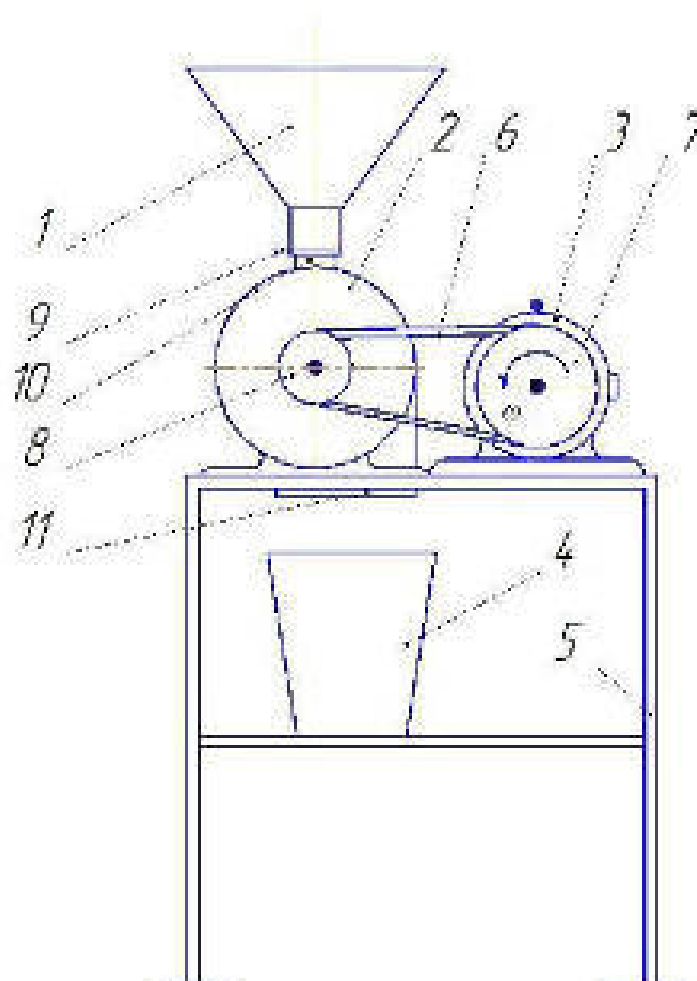
Для проведения исследований была разработана и изготовлена опытная молотковая дробилка кормов с изменяющимся размером ячейки решета (рисунки 3.1, 3.2).

Дробилка состоит из рамы (5), корпуса дробильной камеры (2) с горизонтальным ротором, представляющего собой барабан с неподвижно закрепленными молотками, установленный на горизонтальном валу, который вращается в подшипниковом узле. Привод осуществляется от электродвигателя (3) через клиноременную передачу (6). Имеется приемный бункер (1), загрузочная (10) и выгрузная (11) горловины с регулировочной заслонкой (9). На внутренней поверхности рабочей камеры установлены бичи.

Рабочий процесс осуществляется следующим образом. Исходный материал (зерно) загружается в определенном количестве в приемный бункер (1). При открытии заслонки (9) зерно через загрузочную горловину (10) поступает в рабочую камеру дробилки, где происходит измельчение за счет ударных действий молотков, удара о внутреннюю поверхность рабочей камеры, истирания в воздушно-продуктовом слое. Измельченный материал удаляется из камеры через выгрузное окно (11). С помощью заслонки (9) изменяется подача зерна в дробильную камеру.

Регулирование степени измельчения λ осуществляется несколькими способами:

- регулировкой оборотов барабана;
- числом пакетов молотков;
- решетками с изменяющимся размером ячейки решета.



1 – загрузочный бункер, 2 – корпус дробильной камеры,
 3 – электродвигатель, 4 – приемная емкость, 5 – рама, 6 – ремень клиновидный, 7, 8 – ведущий и
 ведомый шкивы соответственно, 9 – заслонка, 10 – загрузная горловина, 11 – выгрузное окно

Рисунок 3.1– Схема опытной молотковой дробилки с изменяющимся размером ячейки решета

Для проведения исследований процесса дробления в безрешетной молотковой дробилке, согласно программы экспериментальных исследований, была разработана и создана экспериментальная установка. Установка предназначена для исследования процесса дробления с целью определения влияния конструктивных и технологических параметров на основные технико-экономические показатели безрешетной молотковой дробилки вертикального типа.



Рисунок 3.2 – Общий вид молотковой дробилки с изменяющимся размером ячейки решета

Конструкция установки позволит:

- изменять:

- а) производительность дробилки;
- б) модуль помола измельчаемого продукта;
- в) время пребывания материала в рабочей камере;
- г) размер ячейки решета;

- измерять:

- а) среднюю скорость воздушно-продуктового слоя;
- б) затраты энергии на процесс дробления;

- проводить:

- а) отбор измельченного материала в зависимости от частоты вращения барабана;
- б) отбор измельченного материала в зависимости от размера ячейки решета;
- в) силовой анализ измельченного продукта.

На рисунке 3.3 представлен общий вид регулятора «живого» сечения со стороны приемной горловины (для наглядности фотографии горловины была демонтирована) в сравнении со стандартным решетом с круглыми отверстиями.

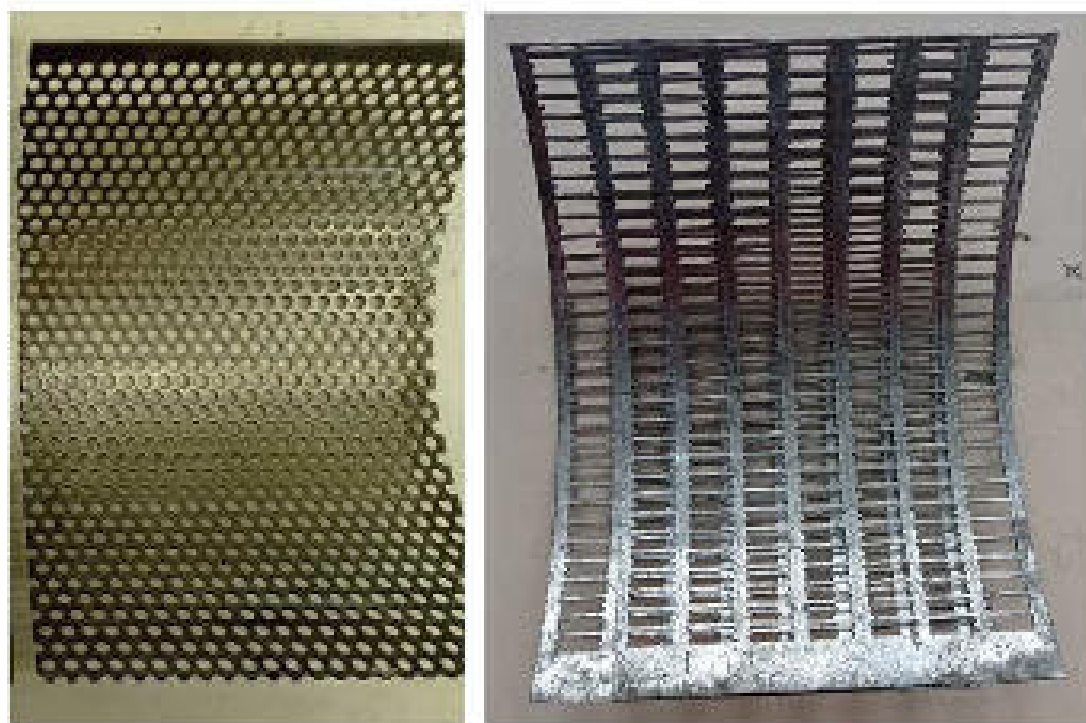


Рисунок 3.3 - Стандартное решето с круглыми отверстиями в сравнении с регулятором «живого» сечения

Продольный размер регулятора «живого» сечение с ячейкой 5х15 мм. Регулировку степени измельчения производили путем перемещения подвижного решета по окружности дробильной камеры вдоль неподвижного. До совмещения отверстий (рисунок 3.3), которые были выполнены симметрично с обеих сторон решета. После совмещения нужных отверстий происходила их совместная фиксация.

В ходе эксперимента производили измельчение пшеницы соответствующего ГОСТ 28672-90 [31].

3.3 Зоотехнические требования, предъявляемые к измельченным концентрированным кормам

В процессе подготовки кормов к скармливанию их необходимо измельчать. За счет измельчения зерна продуктивность животных повышается на 10...15%. Кроме того, необходимость измельчения кормов обусловлена технологическими условиями, так как измельченные корма легче смешивать при приготовлении кормосмесей. Известно, что чем ближе корма по своему гранулометрическому составу, тем выше качество получаемой смеси и меньше время смешивания.

Измельченные корма также легче дозировать. При хранении и транспортировке они

занимают меньший объем. Измельченный корм легче движется внутри технологических линий (в нориях, транспортерах, дозаторах, смесителях и т.д.) и не нарушает технологический процесс.

Зоотехническими требованиями также предусматривается очистка кормов от камней, земли, семян сорных растений, металла и других возможных включений.

К подготовленному зерновому корму зоотехнические требования предусматривают следующие размеры частиц:

- до 3 мм – для крупно-рогатого скота;

- до 1 мм – для свиней;

- до 2...3 мм – для птицы при сухом кормлении и до 1 мм при кормлении влажными мешанками.

Для зерновых кормов однородность смеси должна быть не менее 90 ... 95%.

При измельчении соломы и сена размер резки должен быть следующим: – для крупного рогатого скота 40...50 мм, лошадей – 30...40 мм, овец – 20...30 мм. При смешивании с сочными кормами готовят более мелкую резку – 5...10 мм.

Заготовку силоса для крупного рогатого скота целесообразно производить из кукурузы восковой спелости, когда средняя влажность массы всего растения составляет 60...65 %, а зерна – 40...50%. Качество измельчения массы должно быть таким, чтобы стебли были разрезаны на части 20...30 мм и расщеплены вдоль волокон, а зерно – раздроблено на частицы до 3 мм, кочерыжки – до 5...10 мм, оберточные листья – на 40...50 мм. Для свиней и птицы концентрированный корм может приготавливаться из зерно-кочерыжной смеси, в которой содержится зерно влажностью 35...42 % и 50...60 % кочерыжки. Зерно должно быть измельчено на частицы до 2 мм в количестве не менее 80 %, остальное – на 3...5 мм.

Мелкое измельчение зерна требуется не столько для обеспечения процесса силосования (оно хорошо силосуется и при более крупном измельчении), сколько для хорошего усвоения его животными. Поэтому консервированное крупноизмельченное зерно перед скармливанием необходимо доизмельчать, что приводит к дополнительным затратам.

В ожидании измельчения початки могут храниться на площадке не более двух дней, а зерно – четырех часов.

Согласно ГОСТу 23445-79 «Дробилки молотковые. Общетехнические условия» качество измельченного корма оценивается по остатку на сите диаметром отверстий 3 мм:

- мелкий размол – 5 %;

- средний размол – 10 %;

- крупный размол – 30 %.

При этом наличие неизмельченных, целых зерен не допускается. Стандартами на комбикорма (ГОСТ 13299-71, 9267-68, 9268-70, 8770-58) установлены три степени размола, которые характеризуются средними размерами частиц:

- мелкий размол – 0,2...1,0 мм;

- средний размол – 1,0...1,8 мм;
- крупный размол – 1,8...2,6 мм.

3.4 Устройство, материалы и приборы, применяемые в экспериментах

В соответствии с методикой экспериментальной исследований была изготовлена экспериментальная установка общего вида, которого представлен на рисунке 3.2.

Описание экспериментальной установки приведена в подразделе 3.2. Для определения характеристик электродвигателя кормодробилки используется векторный преобразователь частоты тока MFC 710. Частоту вращения ротора измеряли с помощью лазерного тахометра. При установлении необходимой частоты вращения, открывается задвижка, и начинается процесс дробления зерна. Для измерения массы продукта использовались весы марки BK-600 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Электронные весы BK-600

Для определения модуля помола использовали ситовый анализатор марки А20 (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Определение модуля помола с помощью ситового анализатора А20

Используя экспериментальную установку (рисунок 3.2) можно определить рациональные параметры молотковой кормодробилки, частоту вращения ротора, размер «живого» сечения отверстий решета для достижения более качественного помола зерна при минимальных энергозатратах.

3.5 Методика определения модуля помола

О качестве продукта, полученного при измельчении, судят по результатам ситового анализа, выполняемого на решетном классификаторе.

Показатель, с помощью которого можно оценить тонкость помола в соответствии с ГОСТом 8770-50, является средневзвешенный диаметр частиц (модуль), определяемый по формуле [16]:

$$M = \frac{0,5 \cdot G_0 + 1,5 G_1 + 2,5 G_2 + 3,5 G_3}{100}, \quad (3.1)$$

где M – модуль помола, мм;

G_0 – масса навески на дне классификатора, г;

G_1, G_2, G_3 – масса навесок на ситах с отверстиями диаметром соответственно 1, 2 и 3 мм, г.

Помол считается:

- тонким при $M = 0,2 \dots 1$ мм;
- средним при $M = 1 \dots 1,2$ мм;
- крупным при $M = 1,8 \dots 2,6$ мм.

О работе дробилки можно судить по степени измельчения зерна, определяемой из выражения:

$$\lambda = \frac{D_s}{d_{ср}} \quad , \quad (3.2)$$

где $d_{ср}$ – средневзвешенный диаметр частиц (модуль) измельченного зерна, мм;

D_s – диаметр шара объемом, равным объему одного зерна, называемый эквивалентным диаметром зерна,

По данным С.В. Мельникова, для расчета можно принять значение D_s для ячменя равным 4,2 мм; овса — 3,7 мм; ржи — 3,3 мм; пшеницы — 3,8 мм. Определить удельную площадь поверхности зерна из-за сложной его формы довольно затруднительно. Поэтому определение удельной площади поверхности зерна основывается на использовании понятия эквивалентного диаметра D_s .

Определяют эквивалентный диаметр зерна следующим образом.

Из партии зерна отбирают навеску массой 0,5 кг, руководствуясь методикой ГОСТ 3040-55 «Зерно. Методы определения качества».

Из пробы выделяют две навески зерна по 5 г и от каждой из них отобрать по 100 зерен. Взвешивают отобранные 100 зерен и определяют среднюю массу одного зерна.

В наполненный керосином мерный цилиндр (в мензурку) помещают 100 отобранных зерен и по разнице отметок уровня керосина до и после погружения зерен находят средний объем зерна V_3 , см³.

Опыт по определению среднего объема одного зерна V_3 повторяют еще раз на другой партии из 100 зерен и для дальнейших расчетов принимают среднее значение из двух определений.

По полученному значению объема зерна вычисляют эквивалентный диаметр зерна D_s по формуле:

$$D_s = 1,24 \sqrt[3]{V_3} \quad , \quad (3.3)$$

По полученному значению D_s определяют удельную площадь поверхности S_u , см²/г исходного (начального) зернового материала по формуле:

$$S_H = \frac{6}{\rho D_3}, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность зерна, $г/см^3$.

3.6 Определение производительности

Одним из основных показателей работы машины, является ее производительность.

Производительность определяют в момент установившегося движения. Под установившемся режимом работы дробилки понимают такой период работы, при котором количество зерна, поступающего в камеру на измельчение, равно количеству выходящего продукта в единицу времени. Время определяется исходя из показателей амперметра и индикатора. После установления стрелки прибора на заданном делении включались соответствующие приборы и измерялись показания рабочего процесса.

Часовую производительность определяли по формуле

$$Q = 3600M/t, \quad (3.5)$$

где Q – производительность кормодробилки, $кг/ч$;

M – масса отобранной пробы, $кг$;

t – время отбора пробы, $с$.

Взвешивание отобранных проб производили на весах ВК-600 с точностью до $0,01кг$.

Относительная ошибка взвешивания была в пределах $0,2...0,3\%$. Каждый опыт повторяли в 3-х кратной повторности.

3.7 Определение окружной скорости молотков

Окружную скорость молотков можно определить по формуле:

$$V = \pi \cdot R \cdot n / 30, \quad (3.6)$$

где V – окружная скорость, $м/с$;

R – расстояние от вершины молотка до оси ротора;

n – частота вращения диска, $мин^{-1}$.

Частоту вращения ротора определяли с помощью тахометра, при установившемся режиме работы дробилки.

3.8 Определение затрат энергии на измельчение

При замере расхода электроэнергии использовали векторный преобразователь частоты тока MFC 710, которые включались в момент отбора проб. Мощность затрачиваемую на привод дробилки определяли с учетом КПД электродвигателя и его характеристики.

$$\eta = f(P_0), \quad (3.7)$$

где η - КПД электродвигателя;

P_0 - подводимая мощность, кВт.

Для определения мощности, расходуемой на привод рабочих органов дробилки, применяли формулу

$$N = \frac{1000 \cdot (n_1 - n_2) \cdot C \cdot K_1 \cdot \eta}{t}, \quad (3.8)$$

где N - мощность расходуемая на привод в кВт;

n_1, n_2 - показания счетчика в начале и конце замера;

C - постоянная счетчика (цена деления) $C=0.001$ кВт;

K_1 - коэффициент трансформации, $K_1=2,5$;

η - КПД привода электродвигателя подводимой мощности.

Для оценки работы молотковой дробилки в качестве критерия оптимизации выбрана величина энергозатрат, отнесенная к единице степени измельчения, т.к. эта зависимость более полно отражает связь энергозатрат качества продукта. Она определяется по формуле:

$$Эп = (1000 \cdot N_{\text{зат}}) / Q \cdot \lambda, \quad (3.9)$$

где $N_{\text{зат}}$ - мощность, затраченная на измельчение материала, кВт;

Q - подача материала в дробилку, кг/ч;

λ - степень измельчения материала.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Проведение экспериментов на лабораторной молотковой дробилке

С целью определения рационального типоразмера ячейки решета нами был проведен предварительный эксперимент на лабораторной молотковой дробилке (рисунок 4.1), в ходе которого предстояло выяснить, с каким типоразмером решет обеспечивается получение продукта, соответствующего по гранулометрическому составу требованиям ГОСТа и исследованиям авторов по кормлению сельскохозяйственных животных [5, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 38]. Загрузка дробилки осуществлялась самотеком из загрузочного бункера, уровень зерна в котором для чистоты эксперимента поддерживался на постоянном уровне.



Рисунок 4.1 – Проведение экспериментов на лабораторной молотковой дробилке

В дробилке были комплект решет с диаметром отверстий 4, 5 и 6 мм и толщиной 3 мм, для проведения эксперимента был изготовлен регулятор «живого» сечения с размерами ячеек 6х15 мм и толщиной 1,5 мм.

В ходе эксперимента производили измельчение пшеницы. Опыт производили рандомизировано с трехкратной повторностью. По результатам опытов был построен

график зависимости модуля помола частиц M и коэффициента $K_{ж.с.}$ от установленного продольного размера «живого» сечения для решета с ячейкой 6×15 мм (рисунок 4.2).

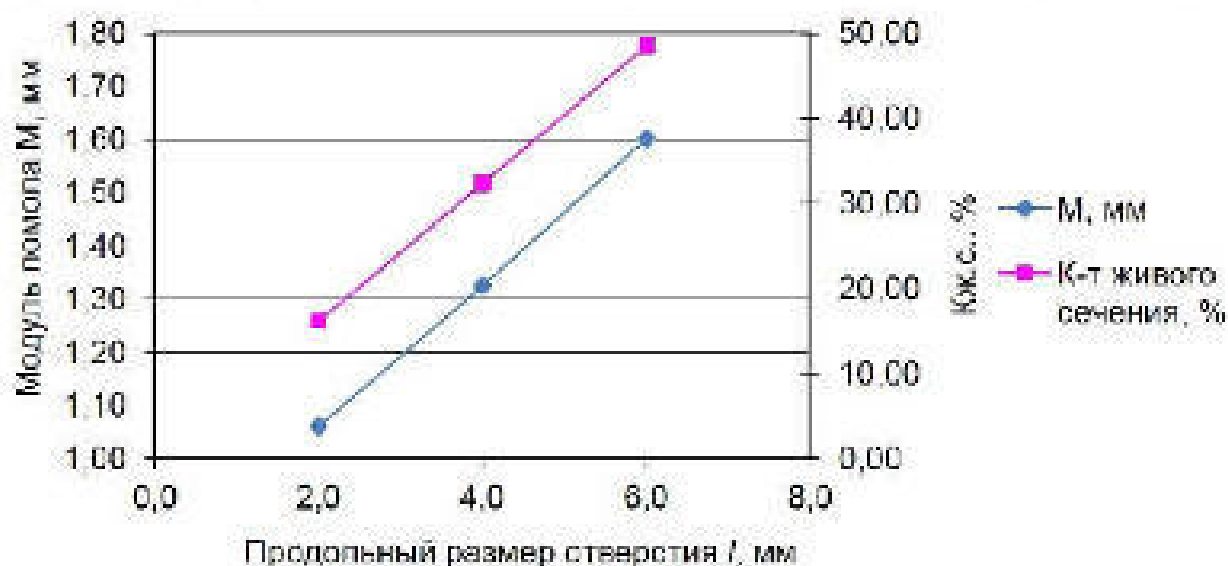


Рисунок 4.2 – График изменения M и $K_{ж.с.}$ от продольного размера отверстий

Из экспериментальных данных видно, что при изменении продольного размера «живого» сечения решет с ячейкой 6×15 мм продольный размер «живого» сечения варьировался от 2 мм до 6 мм, коэффициент $K_{ж.с.}$ менялся в диапазоне 17,49-46,65%, а модуль помола составил при этом 1,22 - 1,99 мм.

4.2. Сравнение работы решет с круглыми отверстиями и с регулятором «живого» сечения

В ходе теоретического исследования было выяснено, что дёрта, полученная при использовании решет с прямоугольными отверстиями, имеет лучшее качество по сравнению с дёртой, полученной при использовании решет с круглыми отверстиями. Поэтому предстояло на экспериментальной установке оценить изменение качества получаемого продукта. Для этого использовали решета из поставляемого комплекта с диаметром отверстий 4, 5 и 6 мм и регулятор «живого» сечения с ячейкой 6×15 мм. Подача материала составляла 0,05 кг/с, окружная скорость молотков равнялась 60 м/с.

4.2.1. Содержание пылевидной фракции

Анализируя содержание пылевидной фракции в готовом продукте (рисунок 4.3), следует отметить, что при использовании регулятора «живого» сечения предложенной конструкции содержание пылевидной фракции ниже, чем при использовании решет с круглыми отверстиями.

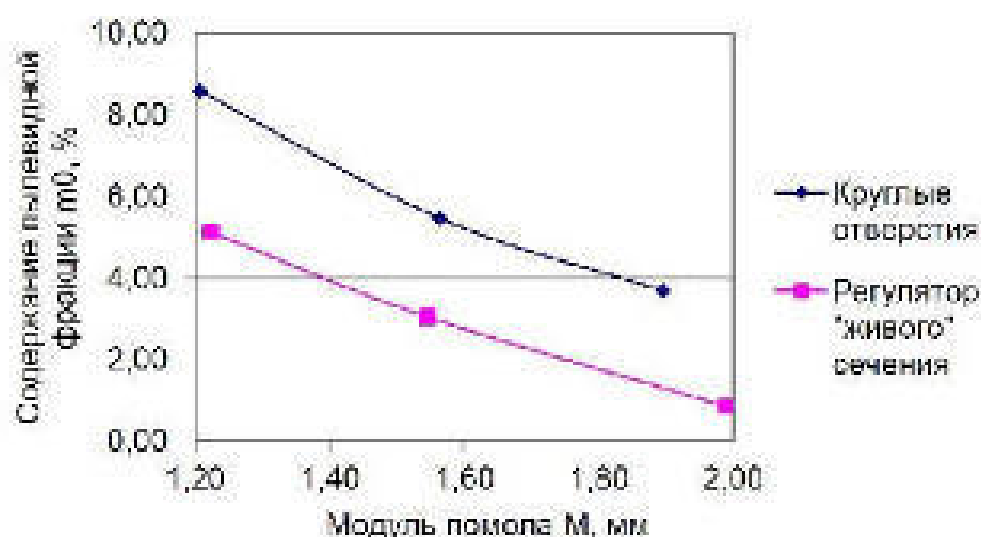


Рисунок 4.3 – Содержание пылевидной фракции

При использовании регулятора «живого» сечения с продольным размером 3 мм дробь с модулем помола 1,22 мм имела 5,13 % пылевидной фракции, в то время как при использовании решета с круглыми отверстиями диаметром 4 мм - 8,59 %. Аналогичные тенденции наблюдаются и при использовании решет с диаметром отверстий 5 и 6 мм. Так модуль помола составил 1,56 и 1,90 мм, а содержание пылевидной фракции 5,46 % и 3,69 % соответственно, что превышает значения, полученные при использовании регулятора «живого» сечения.

4.2.2 Содержание недоизмельченных частиц

Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе недоизмельченных частиц, характеризующихся остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм (рисунок 4.4). Так при использовании решет с круглыми отверстиями диаметром 4 мм остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм составил 1,80 %, а при постановке решет с диаметром отверстий 5 и 6 мм - 3,86 и 4,25 % соответственно при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм. При использовании регулятора «живого» сечения была получена дробь с модулями помола 1,22, 1,55 и 1,99 мм, в которой остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм составил 1,53, 3,50 и 6,69 % соответственно.

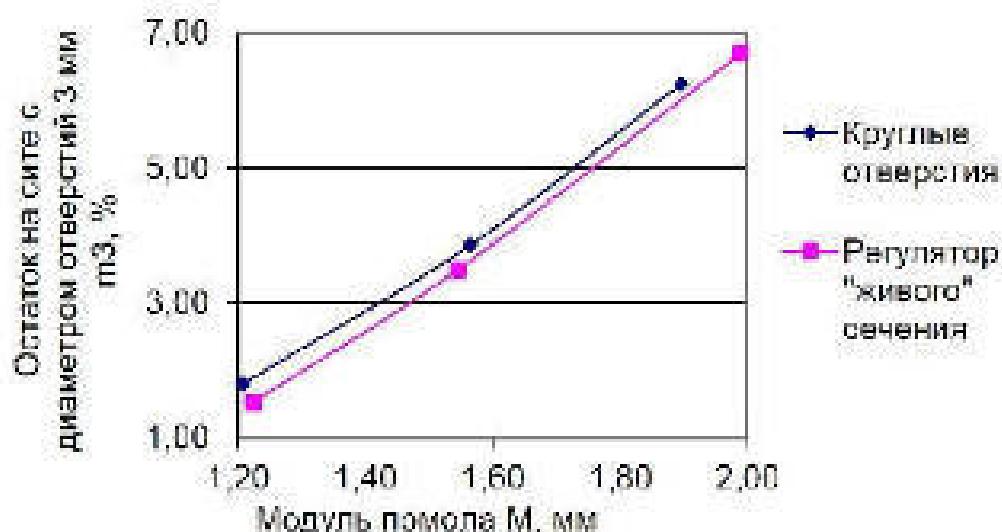


Рисунок 4.4 - Остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм

Анализ суммарной помольной характеристики по плюсу говорит о том, что графики, построенные для дерти, полученной при использовании регулятора «живого» сечения имеют круто нисходящую траекторию в сравнении с графиками, построенными при использовании решет с круглыми отверстиями, что говорит о более выравненном гранулометрическом составе.

4.2.3 Средневзвешенное квадратическое отклонение полученного продукта

Однородность продукта характеризуют графики средневзвешенного квадратического отклонения и коэффициента вариации. Анализируя зависимость разброса гранулометрического состава в готовом продукте (рисунок 4.5), следует отметить, что для дерти, полученной при использовании решет с круглыми отверстиями, коэффициент средневзвешенного квадратического отклонения выше. Так при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм он составил 0,78, 0,86 и 0,88, в то время как при использовании регулятора «живого» сечения этот показатель составил 0,65, 0,74 и 0,72 для модуля помола 1,22, 1,55 и 1,99 мм соответственно.

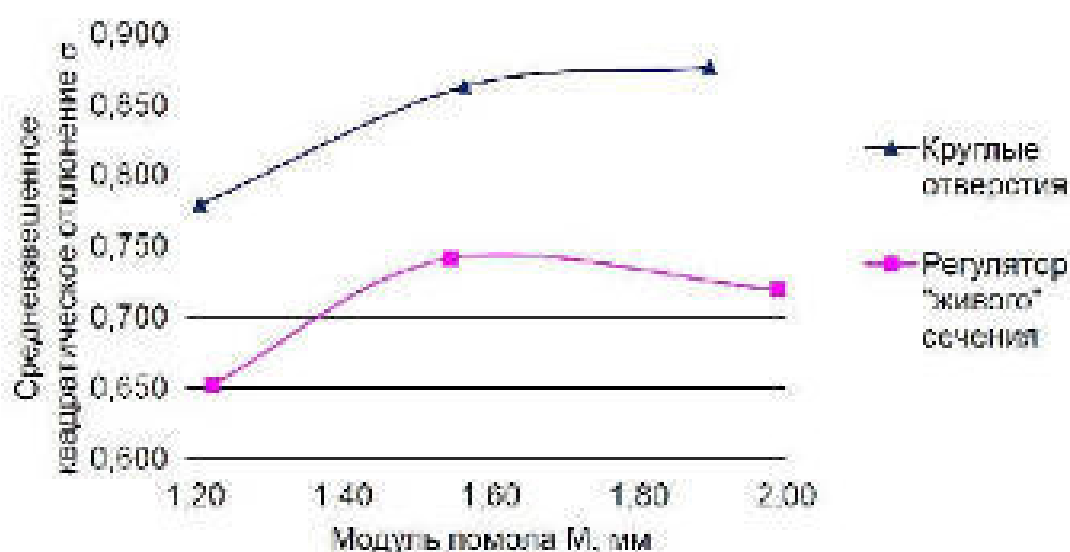


Рисунок 4.5 – Средневзвешенное квадратическое отклонение

Анализируя коэффициент вариации гранулометрического состава в готовом продукте, показывающий какую долю среднего значения составляет его разброс, следует отметить, что он составил для решет с круглыми отверстиями 64,6, 55,2 и 46,2 % при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм, что выше значений, полученных при использовании регулятора «живого» сечения.

Исходя из зависимостей, представленных на рисунках 4.4 и 4.5, можно сделать вывод, что дарт, оцененная содержанием пылевидной фракции и остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм, получаемая при использовании регулятора «живого» сечения имеет лучшее качество, нежели если использовать решета с круглыми отверстиями. Кроме того, полученные зависимости, говорят о том, что дарт имеет лучшую однородность, что положительно влияет на смешиваемость продукта, и в меньшей степени способствует его распылению.

4.2.4 Оценка энергоемкости процесса

В ходе исследования было выяснено, что энергия расходуется на приращение поверхности корма. С целью оценки энергоэффективности предстояло сравнить удельную энергоемкость измельчения $\mathcal{E}_{\text{эфд}}$ при использовании регулятора «живого» сечения и решет с круглыми отверстиями.

Исследуя зависимости, представленные на рисунке 4.6, следует отметить, что удельная энергоемкость измельчения зерна с учетом степени измельчения $\mathcal{E}_{\text{эфд}}$ при использовании решет с круглыми отверстиями диаметром 4, 5 и 6 мм составила 1,77, 2,10 и 2,43 кВт·ч/т ед.ст.изм. для дарты с модулем помола 1,31, 1,56 и 1,90 мм

соответственно. В то же время энергоёмкость измельчения при использовании регулятора «живого» сечения с продольным размером 4, 5 и 6 мм составила 1,51, 1,77 и 2,28 кВт·ч/т – соответственно при модуле помола 1,21, 1,55, 1,99 мм соответственно.

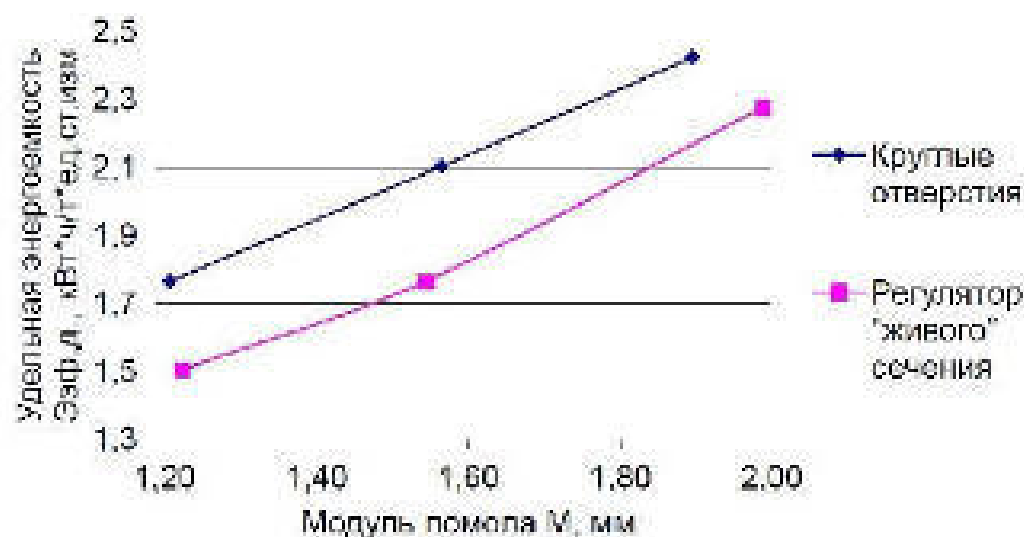


Рисунок 4.6 – Удельная энергоёмкость измельчения $\Sigma_{\text{эфд}}$

Анализ графиков, представленных на рисунке 4.6 показывает, что энергоёмкость измельчения при использовании регулятора «живого» сечения, предложенной конструкции значительно ниже энергоёмкости при использовании решет с круглыми отверстиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Энергоемкость измельчения и эффективность скармливания кормов можно улучшить за счет уменьшения содержания пылевидной фракции и неизмельченных частиц путем совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки;

2. Проведенный обзор существующих конструкций измельчающих машин выявил их существенные недостатки. Принимая во внимание наметившиеся тенденции, была разработана молотковая дробилка, отличающаяся тем, что в ее конструкции используется регулятор «живого» сечения, выполненный в виде подвижного и неподвижного решет с отверстиями прямоугольной формы.

3. В ходе теоретического обоснования получены аналитические зависимости, отличающиеся тем, что отображают влияние прямоугольной и круглой форм отверстий на качественные и энергетические показатели корма.

4. Результаты экспериментов показывают, что дерть с модулем помола 1,56 мм, полученная с использованием регулятора «живого» сечения имеет по сравнению с решетками с круглыми отверстиями на 45,05 % меньшее содержание пылевидной фракции и 32,38 % неизмельченных частиц. Дерть с модулем помола 1,56 мм, полученная при использовании регулятора «живого» сечения имеет на 20,32 % меньшую суммарную площадь по сравнению с решетом с круглой формой отверстий. Данное изменение привело к снижению удельной энергоемкости измельчения.

По результатам экспериментальных исследований определены рациональные значения исследуемых параметров молотковой дробилки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. 1634171 МКН³ А 01 F 29/00 /Измельчитель кормов/ И.Е. Волков, В. С. Комиссаров - Оpubл. 15.03.91 Бюл. №10.
2. Зиганшин Б.Г., Волков И.Е., Хисметов Н.З. Устройство для плавного регулирования модуля помола в безрешетной молотковой дробилке кормов / Патент России № 2120726 Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный аграрный университет". Подача заявки: 29.01.1997. Опубликовано: 27.10.1998 Бюл. № 5.
3. Зиганшин Б.Г., Лукманов Р.Р., Халиуллин Д.Т. Разработка способа определения механических микрповреждений зерна. / Журнал Фундаментальные исследования 264-267 с.
4. Зиганшин Б.Г., Мустафин А.А., Фролов В.Ф., Волков И.Е. Дробилка молотковая / Патент России № 2236297. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный аграрный университет". Подача заявки: 28.11.2001. Опубликовано: 28.11.2001 Бюл. № 5.
5. Коношин И.В., Муртазин В. М. Молотковая дробилка / Патент России №2542121 Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Орловский государственный аграрный университет". Подача заявки: 22.10.2013. Опубликовано: 20.02.2015 Бюл. № 5.
6. Лукманов Р.Р., Дмитриев А.В., Зиганшин Б.Г., Валиев А.Р., Сафин Р.И., Минихаев Р.В. Способ определения механических микрповреждений зерна / Патент России № 2536061. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный аграрный университет". Подача заявки: 2013-08-28 Опубликовано: 20.12.2014 Бюл. №

7. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами / А.Н. Пугачев. - М.: Колос, 1976. - 320 с.
8. Савиных П.А., Сычугов Ю.В., Турубанов Н.В., Касьянов В.Л. Молотковая дробилка / Патент России №2317146 патентообладатель: Государственное учреждение Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого Опубликовано: 20.02.2008 Бюл. № 5.
9. Фнятов М.И., Петров А.А. Молотковая дробилка / Патент России № 229424 патентообладатель: «Оренбургский государственный аграрный университет». Опубликовано: 27.02.2007 Бюл. №6
10. Кулаковский И. В., Кирпичников Ф. С., Резник Е. И. Машины и оборудование для приготовления кормов : справочник часть 1. М.: Россельхозиздат, 1987. С. 285.,
11. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / Л.: Колос, Ленинградское отделение. – 1978. – 560с.
12. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. 311 с.
13. Мельников С.В., Плохов Ф.Г. Определение скорости удара при разрушении зерна. - Труды, ЧИМЭСХ, 1966, Вып. 21. - С.113-117.
14. Мельников С.В., Плохов Ф.Г. Исследование процесса разрушения зерна ударом // Механизация и электрификация сельского хозяйства: - Зап. Ленинградского СХИ. - Л., 1967. - т.108. - Вып.2. - С.212-219.
15. Зиганшин Б.Г. Технологии и технические средства приготовления кормов / Б.Г. Зиганшин. – Казань: Изд-во Казанск ун-та, 2003. – 188с.
16. Семенов Е.В., Коробитин А.А., Карамзин В.А. Расчет производительности молотковой дробилки // Хранение и переработка сельхозсырья.- 1996. - № 1. - с.18.
17. Сыроватка В.И. Исследование процесса измельчения зерна ударом //

Тракторы и сельхозмашины. - 1962. - № 11. - С.27-29.

18. Мельников С.В. Моделирование рабочего процесса в молотковой кормодробилке // Механизация сельскохозяйственного производства: - Зап. Ленинградского СХИ. - Л., 1968. - т.119 -Вып.1. - С.113 - 117.

19. Зиганшин Б.Г. Разработка и обоснование параметров безрешетной молотковой дробилки кормов вертикального типа / Зиганшин Б.Г. // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казанская государственная сельскохозяйственная академия. Казань, 1998.

20. Зиганшин Б.Г. Повышение эффективности технологических средств приготовления кормов в животноводстве на основе расширения технологических возможностей измельчителей / Зиганшин Б.Г. // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Казанская государственная сельскохозяйственная академия. Казань, 2004.

21. Архипов С.М., Волков И.Е., Зиганшин Б.Г. Некоторые особенности моделирования рабочего процесса безрешетной молотковой дробилки// Механизация технологических процессов в растениеводстве и животноводстве: Сб.науч.тр. Казанской ГСХА. - Казань, 1996. - С.8-10.

22. Алешкин В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: Автор. дис. д-ра техн. наук. - Санкт- Петербург - Пушкин., 1995. - 38 с.

23. Алешкин В.Р. Планирование эксперимента при моделировании рабочего процесса кормоприготовительных машин // Интенсификация сельскохозяйственного производства Кировской области: Тр.Киров. с.х. ин-та. - Пермь, 1980. - т.68. - С.102-106.

24. А.с. 173521 СССР Кл. 45 е, 3524, МПК А 01 f. Молотковая дробилка /В.И.Сыроватка (СССР). - № 747237/30-15; Заявлено 30.09.61; Опубл. 14.09.65; Бюл. № 15.

25. Зайнуллин Р.Р. Анализ конструкций измельчителей корнеклубнеплодов / Р.Р. Зайнуллин, И.Р. Нафиков // В сборнике: Агроинженерная наука XXI

века Научные труды региональной научно-практической конференции. 2018. С. 87-91.

26. Хасанова Ф.Ф. Дробилка молотковая безрешетная для измельчения концентрированных кормов / Ф.Ф. Хасанова, И.Р. Нафиков, Ф.Ф. Хасанов, Р.Р. Мусин, И.М. Гомаа // В сборнике: АГРАРНАЯ НАУКА XXI ВЕКА. АКТУАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ Труды III международной научно-практической конференции. 2019. С. 197-201.

27. Зайнуллин Р.Р. Экспериментальная установка для дробления кормов / Р.Р. Зайнуллин, И.Р. Нафиков // Научные труды I международной научно-практической конференции посвященной памяти Ю.И. Матяшина (в печати).

1. Балданов, М. Б. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках / М. Б. Балданов // Сб. тр. Бурятской с.-х. академии. - Вып. 38 - 1995. - С. 11-14.

2. Барабашкин, В. П. Молотковые и роторные дробилки / В. П. Барабашкин - 2-е изд., доп. и перераб. изд. - М.: Наука, 1973. - 143 с.

3. Булатов, С. Ю. Исследование влияния коэффициента перекрытия камеры измельчения молотковой дробилки зерна на ее аэродинамические характеристики / С. Ю. Булатов, В. Н. Нечаев // Вестник НГИЭИ. - 2012. - №8. С. 3-11.

4. Черепков А.В. Совершенствование процесса измельчения зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки: дис. ... к-та техн. наук : 05.20.01 / Черепков Александр Викторович - М., 2016. - 152 с.

32. Денисов, В. А. Повышение эффективности процесса измельчения зерновых компонентов комбикормов / дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Денисов Валерий Алексеевич - М., 1992. - 420 с.

33. Коношин, И. В. Использование в молотковых дробилках решет с регулируемым живым сечением / И. В. Коношин, А. В. Звехов, А. В. Черепков // Кормопроизводство. 2014. - №1. - С. 44-48.

34. Малич, Н. Г. Анализ и перспективы развития отечественных машин для дробления твердых материалов / Н. Г. Малич, В. С. Блохин, А. О. Дегтярев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. - №1. - С. 365-380.

35. Мельников, С. В. Расход энергии на создание воздушного потока ротором дробилки / С. В. Мельников, Ф. С. Кирпичников // Записки ЛСХИ. 1976 Т. 290. С. 16-24.
36. Мельников, С. В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками : дис. ... д-ра техн. наук (410). / Мельников Сергей Васильевич - Л., 1969. - 509 с.
37. Наумов, И. А. Совершенствование кондиционирования и измельчения пшеницы и ржи / И. А. Наумов - М.: Колос, 1975. - 175 с.
38. Пат. № 2338441 Российская Федерация, МПК А 23 F 17/00. Малогабаритная комбикормовая установка / Савиных П. А., Палкин А. В., Турубанов Н. В., Лодыгин Д. Г. № 2007103954/13, заявлено 01.02.2007, опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32, 5 с.
39. Пат. № 2520653 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/04 Молотковая дробилка / Коношнин И. В., Черепков А. В. № 2012149728/13, заявлено 21.11.2012, опубл. 27.06.2014 Бюл. № 18, 8 с.
40. Пат. на полезную модель № 76248 Российская Федерация. Смеситель / Савиных П.А., Турубанов Н.В., Лодыгин Д.Г. № 2008103294/22, заявлено 28.01.2008, опубл. 20.09.2008, Бюл. № 26, 2 с.
41. Павцев, В. Г. Совершенствование рабочего процесса молотковой дробилки закрытого типа : дис. ... канд. техн. наук 05.20.01 / Павцев Виктор Григорьевич - Воронеж, 1998. - 169 с.
42. Передня, В. И. Механизация приготовления кормосмесей для крупного рогатого скота / В. И. Передня. - Мн.: Ураджай, 1990. - 152 с.
43. Гильмуллин И.Т. Обзор машин для измельчения зерна / И.Т. Гильмуллин, З.С. Хабибуллин, Н.З. Яруллин // Труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные достижения аграрной науки» посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, академика академии Аграрного образования, лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, заслуженного изобретателя СССР Гайнанова Х.С. – Казань. Изд-во Казанского ГАУ, 2021. (в печати)
44. Яруллин Н.З. Разработка машины для дробления зерна / Н.З. Яруллин, И.Т. Гильмуллин, И.Р. Нафиков // Труды Всероссийской (национальной)

научно-практической конференции «Современные достижения аграрной науки» посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, академика академии Аграрного образования, лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, заслуженного изобретателя СССР Гайнанова Х.С. – Казань. Изд-во Казанского ГАУ, 2021. (в печати)

Таблица – Результаты расчетных данных

№ опыта	Форма решета	Диаметр отверстия решета и размер живого сечения	Окружающая скорость молотков	Подача зерна, кг/с	M, мм	Эплл, кВт*ч/т
1	Крутое	4	60	0,05	1,21	1,77
2		5	60	0,05	1,56	2,1
3		6	60	0,05	1,9	2,42
4	Живое сетевое	4	60	0,05	1,22	1,51
5		5	60	0,05	1,55	1,77
6		6	60	0,05	1,99	2,28

Таблица 2 – Результаты предварительного эксперимента

№ опыта	Типоразмер отверстий решет, мм	Продольный размер «живого» сечения, мм	Окружающая скорость, м/с	Подача зерна, кг/с	Остаток на ситах, г				Кжс, %	М, мм
					3 мм	2 мм	1 мм	Дно		
1	8x40	6	60	0,05	6,78	37,4	45,83	8,41	46,65	1,99
2	8x40	5	60	0,05	3,55	17,63	59,58	19,67	29,16	1,55
3	8x40	4	60	0,05	1,52	8,03	56,8	32,2	17,49	1,23
4	8x40	6	60	0,05	6,45	38,09	45,34	8,7	46,65	1,99
5	8x40	4	60	0,05	1,51	7,66	58,38	31,67	17,49	1,22
6	8x40	4	60	0,05	1,56	8,38	59,01	33,28	17,49	1,22
7	8x40	5	60	0,05	3,49	18,04	58,83	20,77	29,16	1,54
8	8x40	6	60	0,05	6,83	39,85	47,75	8,56	46,65	1,99
9	8x40	5	60	0,05	3,44	17,08	58,74	20,17	29,16	1,54