

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»
Институт механизации и технического сервиса

Кафедра машин и оборудования в агробизнесе
Направление подготовки 35.04.06 Агроинженерия
Направленность (профиль): Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
на соискание квалификации «магистр»

Тема: Исследование дробления зерна в молотковой дробилке

Студент группы М292-02 _____  _____ Хабидуллин З.С.
подпись Ф.И.О.

Научный руководитель,
к.т.н., доцент _____  _____ Лукманов Р.Р.
подпись Ф.И.О.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите
(протокол №8 от «26» января 2022 г.)

Зав. кафедрой _____  _____ Халиуллин Д.Т.
ученое звание подпись Ф.И.О.

Казань - 2022 г.

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа (Магистерская диссертация) состоит из пояснительной записки на 58 листах печатного текста, содержит 22 рисунка, список использованной литературы содержит 33 наименования.

Во введении обосновывается выбор темы и ее актуальность, а так же формируются цель и задачи проекта.

В первом разделе приводятся тенденции развития способов измельчения, анализ существующих конструкций дробилок и их рабочих органов.

Во втором разделе приведены факторы влияющие на процесс дробления зерна, приведены зависимости для определения конструктивных параметров рабочих органов молотковой дробилки, а так же расчеты мощности и производительности.

В третьем разделе приведена программа и методика экспериментальных исследований, методики определения модуля помола, производительности и удельного расхода электроэнергии на измельчение.

В четвертом разделе приведен анализ экспериментальных исследований, где рассмотрены влияние диаметра отверстий решета на модуль помола, на производительность и удельного расхода электроэнергии на измельчение, а так же количества молотков на модуль помола.

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

ABSTRACT

The final qualifying work (Master's thesis) consists of an explanatory note on 58 sheets of printed text, contains 22 drawings, the list of references contains 33 titles.

The introduction justifies the choice of the topic and its relevance, as well as the purpose and objectives of the project are formed.

The first section provides trends in the development of grinding methods, analysis of existing designs of crushers and their working bodies.

In the second section, the factors influencing the process of grain crushing are given, dependencies for determining the design parameters of the working bodies of a hammer crusher are given, as well as calculations of power and productivity.

The third section contains the program and methodology of experimental studies, methods for determining the grinding module, productivity and specific energy consumption for grinding.

In the fourth section, an analysis of experimental studies is presented, where the influence of the diameter of the sieve holes on the grinding module, on the productivity and specific energy consumption for grinding, as well as the number of hammers on the grinding module are considered.

The explanatory note concludes with conclusions, which reflect the essence of the work performed, allowing to increase the efficiency of the feed crusher.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
1.1. Требование к качеству кормов	8
1.2 Классификация способов дробления	9
1.3 Обзор существующих конструкций дробилок зерна	12
1.4 Анализ факторов, влияющих на рабочий процесс молотковых дробилок	20
1.5. Исследование влияния окружной скорости молотков на степень измельчения и на удельный расход энергии	22
1.6 Анализ теоретических исследований технологического процесса измельчения зерна	23
1.7 Цель и задачи исследования	27
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	28
2.1. Факторы, влияющие на процесс дробления	28
2.2. Расчет молотков дробилки	30
2.2.1. Расчет размеров молотков	30
2.2.2. Расчет на прочность молотка дробилки	32
2.3 Расчет теоретической производительности и определение действительной производительности дробилки	34
2.4. Расчет мощности, потребной для процесса измельчения в молотковой дробилке	36
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	38
3.1 Программа экспериментальных исследований	38
3.2. Методика определения модуля помола зерна	38
3.3. Методика определения удельного расхода электроэнергии на процесс дробления	40
3.4. Методика определения производительности	41

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	45
4.1. Исследование влияния диаметра решет на модуль помола	45
4.2. Исследование влияния количества молотков на технические показатели работы дробилки	49
4.3. Исследование влияния диаметра отверстий решет на производительность при постоянной мощности	51
4.4. Исследование удельного расхода электроэнергии на процесс дробления	52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	55
ПРИЛОЖЕНИЯ	59
Приложение А	60
Приложение Б	61
Приложение В	61

ВЕДЕНИЕ

В современных условиях интенсивное развитие пищевой промышленности и значительный подъем в развитии сельского хозяйства, особенно в производстве зерна, стали основным катализатором, способствующим бурному развитию отрасли животноводства. Следует упомянуть еще одну немало важную отрасль, входящую в агропромышленный комплекс – это кормопроизводство, которое имеет существенную значимость для развития животноводства. От степени развития растениеводства и производства корма зависит возможность производить молоко, мясо, шерсть, шкуры и остальные продукты животного происхождения.

Важно всегда придерживаться общих правил приготовления корма и комбикорма, чтобы получить качественный продукт, так как это значительно отражается на продуктивности и здоровья животных. Исходя из вышесказанных, следует хорошо подготавливать зерна к скашиванию, тем более качественно измельчать.

Своей популярностью среди оборудования для комбикорма выделяется дробилка для зерна, с помощью которой производят дробление зерновых культур. Существуют множество разных зернодробилок, но каждая отличается между собой по разным критериям, например, такие как производственные возможности, технические характеристики, цены и так далее.

Дробилка одна из самых незаменимых аппаратов в сельском хозяйстве. С помощью этого устройства можно эффективно и быстро раздробить зерно и приготовить корм для птиц и животных. Некоторые модели позволяют дробить продукты, содержащие масло, другие только обычные зерновые культуры (ячмень, рожь, пшеница, гречка). Самые мощные оборудования способны переработать даже небольшие початки кукурузы и корнеплоды. По сей день не до конца изучены и решены некоторые вопросы, касающиеся

энергоёмкости дробления. Таким образом, нашей целью является тщательное исследование дробления зерна в молотковой дробилке.

Цель исследования: Исследование процесса дробления зерна в молотковой дробилке ЗУБР-1.

Задачи исследования:

1. Изучить требования к качеству измельченных кормов;
2. Проанализировать существующие технологии измельчения зерна и конструкции для дробления;
3. Рассчитать конструктивные и технологические параметры молотковой дробилки ЗУБР-1;
4. Теоретически исследовать влияние конструктивных и технологических параметров рабочего процесса молотковой дробилки на производительность и энергоёмкость процесса измельчения;
5. Экспериментально исследовать влияние конструктивных параметров молотковой дробилки на качественные и энергетические показатели готового продукта.

Объектом исследования является технологический процесс измельчения зерна в молотковой дробилке, а также ее основные конструктивные элементы.

Предметом исследования являются закономерности влияния основных конструктивных параметров молотковой дробилки на эффективность процесса измельчения зерна.

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследований выполнена с использованием методов и методик, применяемых в физике, математике, теоретической механике, теории машин и механизмов. Единицы измерения использовали в соответствии с международной системой СИ. Экспериментальная часть выполнялась с использованием теории планирования эксперимента.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Требования к качеству кормов

Высокое качество – самое важное требование, предъявляемым кормам. Для обеспечения продуктивного роста, развития, хорошего функционирования всех систем у животных в сельском хозяйстве соблюдают нужный объем питательных веществ. Высококачественные корма являются источниками энергии, что в свою очередь играет большую роль. Сбалансированное питание очень важный процесс для животных. Именно при таком питании у животных развивается полноценное развитие, максимальная продуктивность и быстрый прирост массы. Для животных разных возрастов и видов существуют определенные требования к составу и пищевой ценности кормов. Только зная состав корма, можно рассчитать количество еды и правильно составить рацион.

Каждая партия корма должна проходить через полный анализ. Присутствие посторонних запахов или иных несоответствий приводит к устранению, так как гниль и посторонние запахи – это некачественное сырье. Такой исход может появиться из-за использования оборудования с технологическим дефектом, или же при неправильном хранении самого корма.

Основные требования предъявляемые к кормам:

- наличие перевариваемого протеина — от 80 до 160 г в 1 корм. ед.;
- наличие сырой клетчатки — от 0,4 до 10%;
- влажность корма для птицы – не более 13%;
- влажность кормов для рыб – не более 13,6%;
- влажность корма для прочих видов животных – не более 14,5%;
- уровень влажности кормов-концентратов для КРС – не более 14%;
- наличие вредной примеси — до 0,26%;

По ГОСТу «Дробилки молотковые. Общетехнические условия» можно оценить качество корма исходя из остатка на сите, диаметр отверстий которых 3 мм:

- мелкий размол до 5%;
- средний размол до 10%;
- крупный размол до 30%.

Стандартами на корма (ГОСТ 13299-71, 9267-68, 9268-70, 8770-58) составлены три степени размола, которые можно характеризовать средними размерами частиц:

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

При этом наличие целых зерен не допускается. Размеры частиц размола, в основном, зависят от вида и возраста животного.

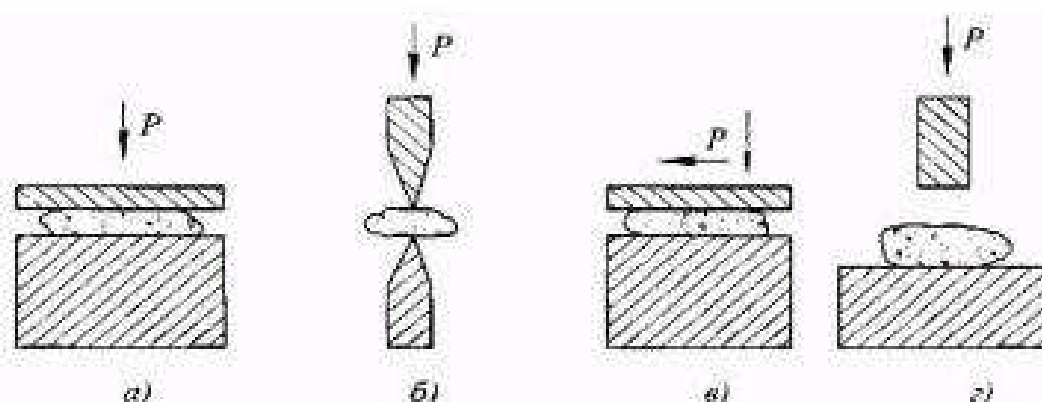
1.2 Классификация способов дробления зерна

Практически во всех животноводческих фермах применяются машины с нужным комплексом и оборудованием для изготовления высококачественного корма. Такой метод помогает фермерам уменьшить расходы себестоимости сырья животноводства и гарантирует высокую производительность труда.

То, что домашние животные и птицы лучше переваривают перемолотое зерно, было известно еще нашим предкам. В связи с тем, что при соприкосновении пищеварительного сока с кормом, происходит увеличение перевариваемости и воздействие питательных веществ. Люди вкладывали большие усилия и средства для измельчения корма. В современном мире эта задача не составляет труда, её с легкостью можно решить при помощи зернодробилок.

В наши дни существует много способов разрушения зерна, самыми известными из которых являются – дробление сжатием, ударом,

раздавливанием и истиранием (рисунок 1.1).



а – раздавливание; б – сжатие; в – истирание; г – удар

Рисунок 1.1 – Способы разрушения зернового материала.

- при раздавливании внутри зерна напряжение доходит до предела прочности и происходит разрушение;
- при сжатии, где наибольшее скопление напряжения, происходит разрушение;
- воздействие нормальных и касательных напряжений происходит при истирании материала. Это древнейший метод разрушения;
- при ударе между двумя рабочими органами происходит разрушение, в процессе измельчения кинетическая энергия играет большую роль;

Благодаря фракционному составу получаемой продукции можно оценить долю частиц чистого эндосперма. Для повышенной продуктивности животных и их нормальной жизнедеятельности важно качественно измельчить корма.

В инженерном отношении измельчение кормов является преимущественно энергозатрачиваемой операцией. Во всем мире, для измельчения зерна расходуется до 50% электроэнергии, при этом значительная доля расходуется без пользы: преобразуется в тепло и другие виды энергии [1, 2].

Измельчение – процесс разделения твёрдого тела до необходимых размеров посредством приложения внешних сил [3]. При применении и

комбинировании разных видов дробления уменьшается энергоемкость и увеличивается эффективность кормоизмельчителей.

В настоящее время существует много усовершенствованных дробилок зерна. Это позволяет одновременно включать в себя несколько видов измельчения, такие как истирание и удар, истирание и раздавливание и так далее. Потребность в комбинировании разных видов измельчения вызывается многообразием размеров и свойств измельчаемого материала, а также требований к свойствам и размерам готового продукта.

Существует несколько основных типов дробилок: валковые, щековые, конусные и ударного действия. Ударного действия дробилки разделяют на роторные и молотковые.

Для среднего и крупного дробления материалов горнорудной, строительной промышленности используют щековые дробилки. В данной дробилке расположены специальные щеки (плоские поверхности), благодаря которым измельчается материал. Принцип дробилки состоит в том, что образованная двумя щеками форма клина – это и есть камера дробления, где происходит разрушение зерна. Одна щека из которых подвижна, а другая нет. Дробление материала происходит за счет периодического движения подвижной щеки.

Главное отличие валковых дробилок - это вращающиеся навстречу друг друга валки. Материал подвергается дроблению раздавливанием и истиранием за счет поступления сверху и попадания в пространство между валками. Расстояние между валками определяет размер выходящего продукта.

Конусные, когда одна коническая плоскость эксцентрично движется относительно к другой. Попадая в это пространство между подвижной поверхностью и конусообразной неподвижной чашей происходит раздавливание материала.

Роторные дробилки представляют собой машины ударного действия, поскольку измельчение зерновых и зернобобовых культур происходит

ударным способом. Надежно прикрепленные на роторе биты выполняют быстрые вращения, за счет этого происходит дробление. На стенках корпуса зернодробилки установлены приемный лоток, отражательные плиты, колосняковые решетки, которые формируют камеру дробления [4].

Молотковые дробилки – являются одним из самых популярных устройств для измельчения зерновых культур. Важным и уникальным свойством молотковых дробилок является высокая степень дробления и бюджетная стоимость измельченного сырья.

1.3 Обзор существующих конструкций дробилок зерна

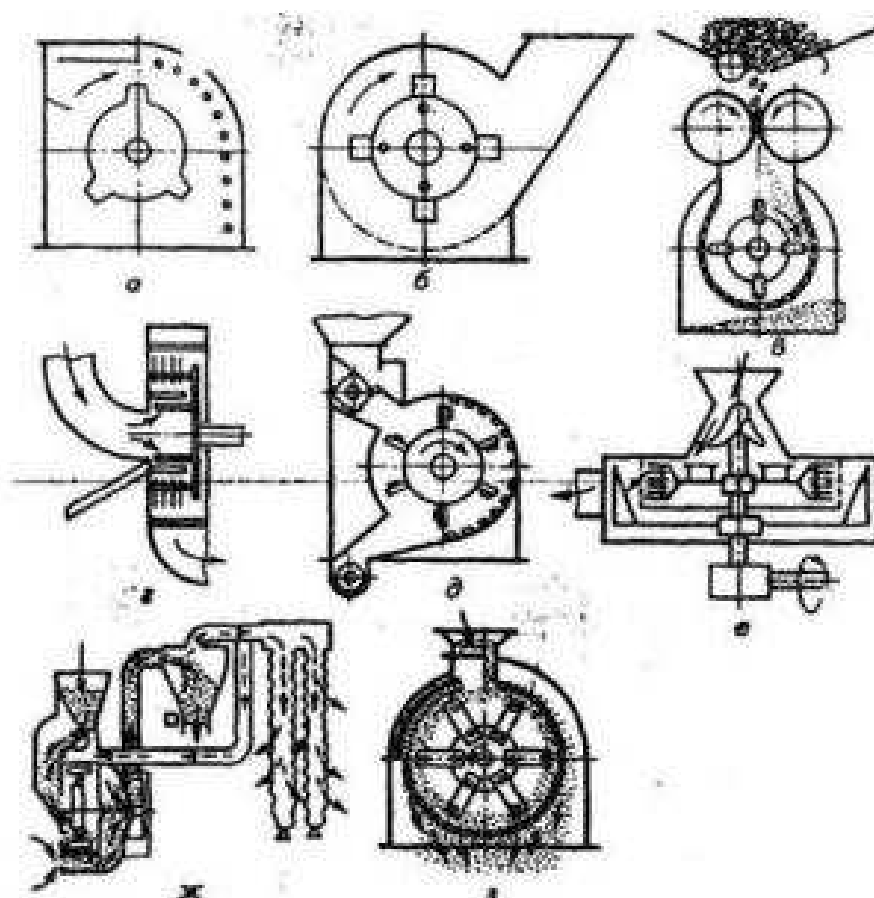
Для производства концентрированных кормов, в основном, применяют измельчители ударного действия – дробилки молоткового типа.

Достоинствами данных дробилок являются высокий уровень надежности в работе, простота и компактность установки, все рабочие режимы цикличны, высокая скорость работы. Перечень данных свойств дает возможность широко применять их в народном хозяйстве.

Так же, дробилки молоткового типа имеют некоторые недостатки: высокая потребность энергии, значительный износ органов дробления, высокий уровень переизмельченных частиц, неравномерный гранулометрический состав сырья.

Главными и основными органами всех дробилок являются: корпус, имеющую загрузочную горловину, молотковый барабан с молотками, дек и решета (рисунок 1.2).

За счет рабочей операции в камере дробления различают дробилки открытого и закрытого вида.



а – открытого типа; б – закрытого типа; в и г – двухстадийные; д – с жестким креплением рабочих органов; е – горизонтальная; ж – с замкнутым воздушным потоком; з – с шарнирным креплением молотков

Рисунок 1.2 - Схемы молотковых дробилок сельскохозяйственного назначения

Главным механическим фактором в дробилках открытого типа является свободный удар молотка по кускам большой массы. В процессе измельчения материала в дробилках открытого типа зерно быстро удаляется, при этом перемещаясь не замыкает окружность. Именно в таких дробилках, в основном, дробят крупнокусковые, сухие, хрупкие и не мажущиеся материалы (мел, ракушки, соль, гранулы).

В дробилках закрытого типа весь барабан и материал, который поступает в дробильную камеру, охватываются за счет решета и деки. Уже после материал, находясь в камере в виде рыхлого продуктово - воздушного состояния, осуществляет круговые движения. Именно в этот момент, когда

материал проходит через среду движущегося слоя, совершается измельчение путем многократного удара молотков и истирания.

Большое распространение получили дробилки закрытого типа при приготовлении кормов. Классификация, показывающая весь их рабочий процесс и все конструктивные особенности, показана на рисунке 1.3.



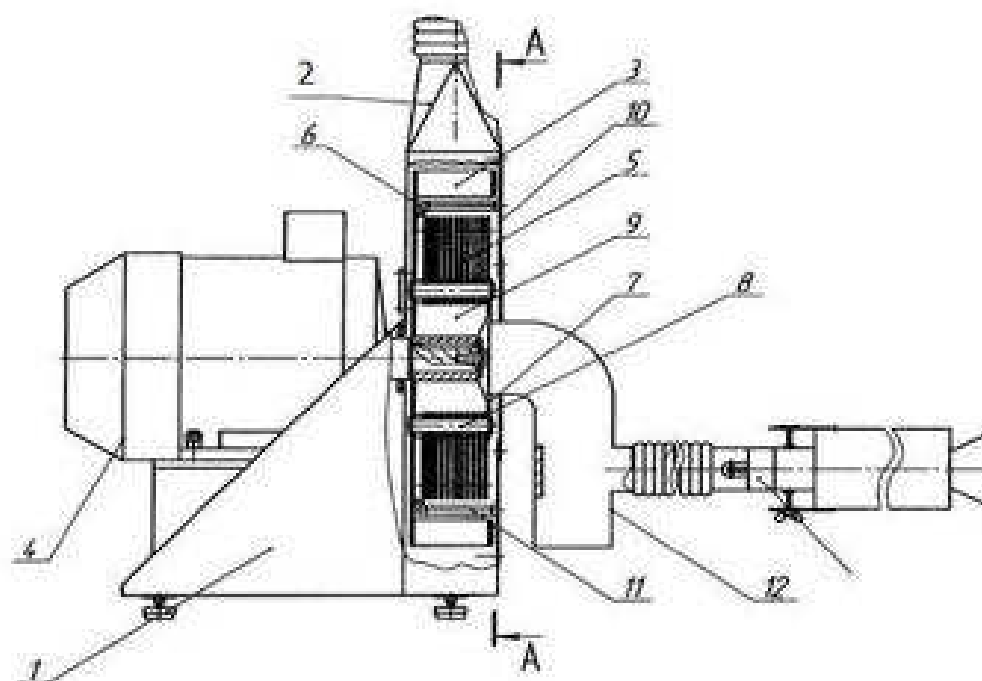
Рисунок 1.3 - Классификация молотковых кормодробилок по способу организации рабочего процесса

Молотки, деки и решета – это рабочие органы, которые играют важную роль в качественном измельчении. Различают объемные и пластинчатые молотки в дробилках. Объемные молотки с двумя отверстиями могут быть сплошными и составными, а пластинчатые, в свою очередь, фигурными, прямоугольными и со ступенчатыми конусами.

Тонкие молотки, имеющие толщину 2...3 мм, используют для измельчения зерен и мягких продуктов.

В начальном этапе по материалам патентного поиска и библиотечного фонда, нами было выполнено исследование.

Молотковая дробилка (Патент РФ №2317146), которая представлена на рисунке 1.4 состоит из корпуса 1, внутри которого имеется съемный кожух 2 наружного вентилятора 3.

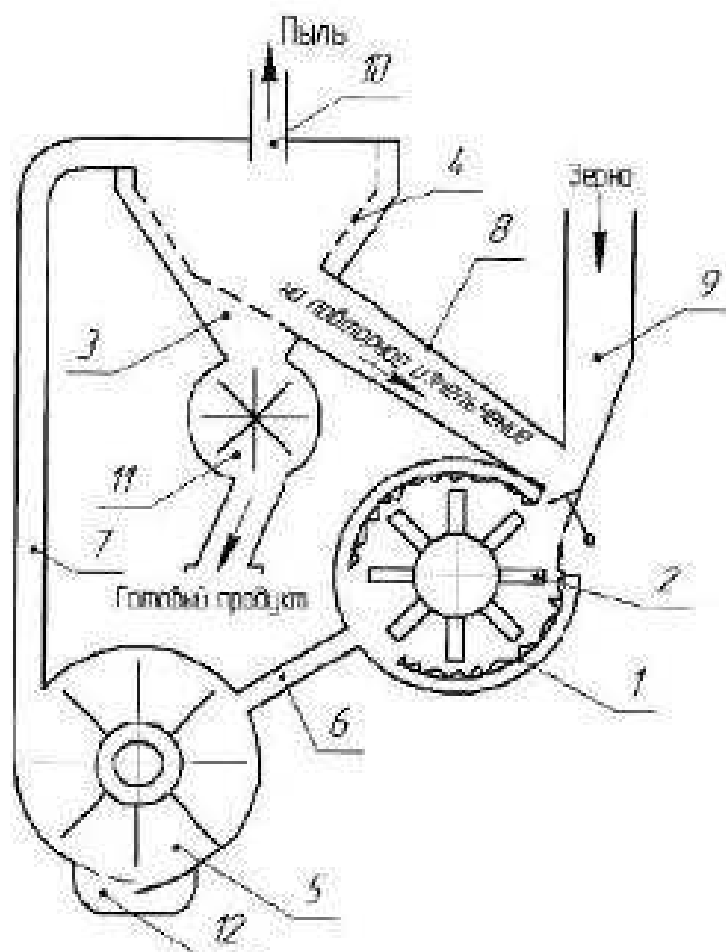


- 1 – корпус; 2 – кожух; 3 – наружный вентилятор; 4 – электродвигатель;
 5 – молотковый ротор; 6 – внутренний диск; 7 – наружный диск; 8 – ось;
 9 – дополнительный вентилятор; 10 – крышка; 11 – дека решето
 12 – камнеуловитель

Рисунок 1.4 – Молотковая дробилка (Патент РФ №2317146)

Главными минусом данной конструкции является невысокая пропускная способность, высокая трата энергии, большие габариты.

На рисунке 1.5 изображена дробилка для зерна, которая содержит вентилятор, камеру для дробления и циклон, в котором смонтировано решето с зазором [5].



1 – дробильная камера; 2 – ротор; 3 – циклон; 4 – решето; 5 – вентилятор - швырляка; 6 – зернопровод; 7 и 8 – кормопроводы; 9 – загрузочный бункер; 10 – пылепровод; 11 – шлюзовой затвор; 12 – ловушка твердых включений.

Рисунок 1.5 – Модернизированная дробилка для зерна

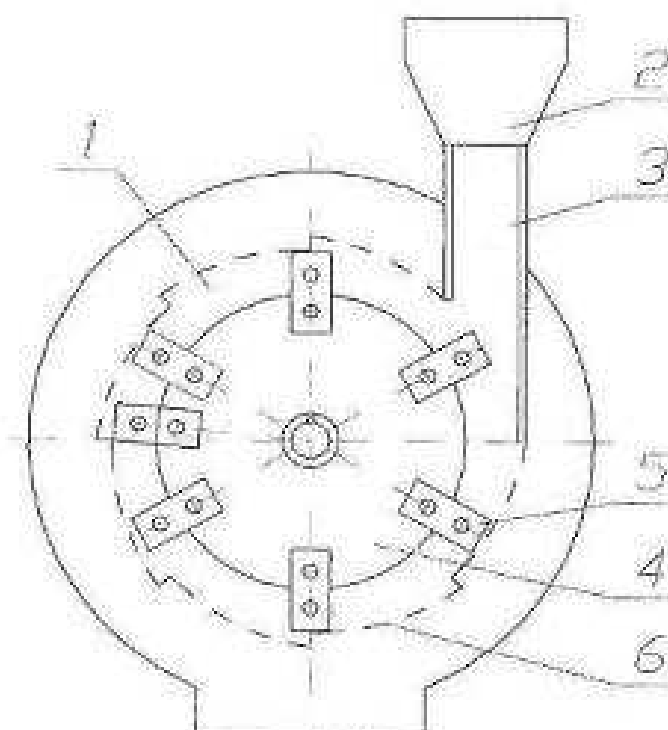
(Патент РФ №151368)

Вентилятор соединен с выходом дробильной камеры, а загрузочный бункер соединен с кормопроводом. Для вывода готового продукта предназначен шлюзовой затвор, а пылепровод находится в верхней части циклона. Чтобы удалить инородные тела из смеси продукта устанавливают

ловушку твердых включений, которая находится в нижней части корпуса вентилятора. Она состоит из фракций: пылевидная, требующая гранулометрический состав и недоизмельченного зерна.

Недостатком этой конструкции считается сложность обслуживания и высокая трата энергии.

Дробилка для зерна (рисунок 1.6) относится к оборудованию для измельчения зерновых масс, применяемых для кормления животных, а также других сыпучих материалов.



1 – дробильная камера; 2 – бункер; 3 – загрузочная горловина;

4 – ротор; 5 – молотки; 6 – решето

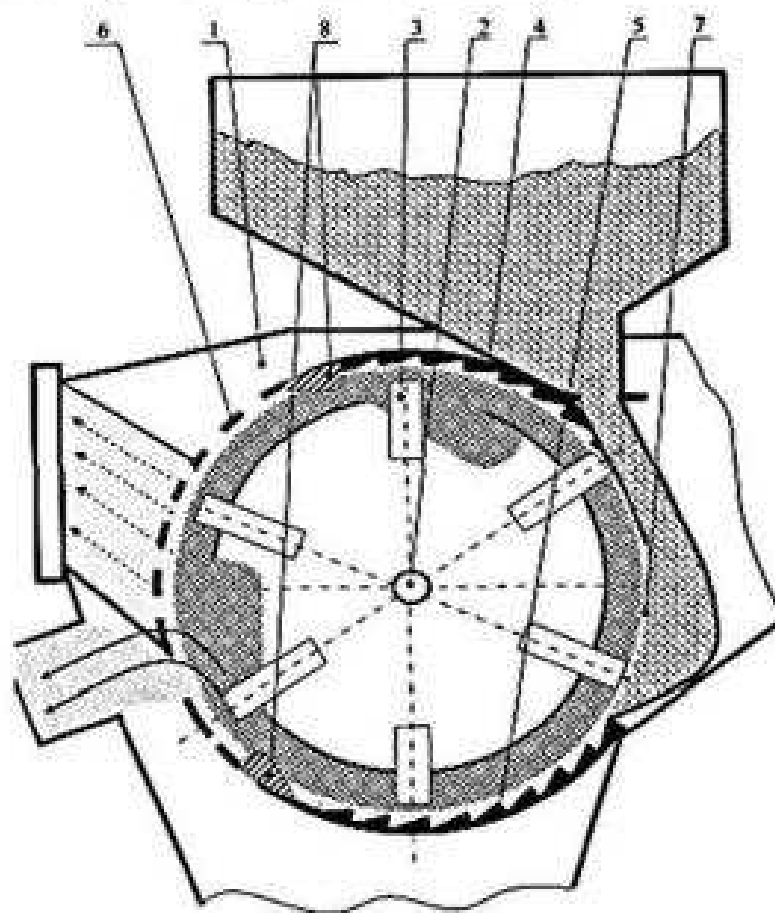
Рисунок 1.6 – Молотковая дробилка (Патент РФ 2287371)

Дробилка имеет дробильную камеру, бункер для загрузки зерна, решето, которое установлено по периферии дробильного ротора с молотками. Задняя сторона каждого отверстия решета выступает к центру ротора по направлению его вращения, загрузочная горловина установлена тангенциально. Решето выполненное в виде сегментов, расположено так, что зазор между сегментами решета и молотками ротора дробилки регулярно

уменьшается по направлению вращения ротора, начиная от загрузочной горловины на расстояние от S_{max} до S_{min} .

Особенным недостатком является то, что при вращении ротора, внутри дробильной камеры, кольцевой слой измельчаемого продукта приобретает значительную скорость и сокращает результативность взаимодействия между измельчаемым материалом и молотками, за счет этого роль решета как пассивного измельчающего органа остается незначительной, что приводит к дополнительным энергозатратам.

Дробильная машина, представленная на рисунке 1.7, относится к устройствам для дробления зерна и других сыпучих материалов в сельском хозяйстве и комбикормовой промышленности [9].



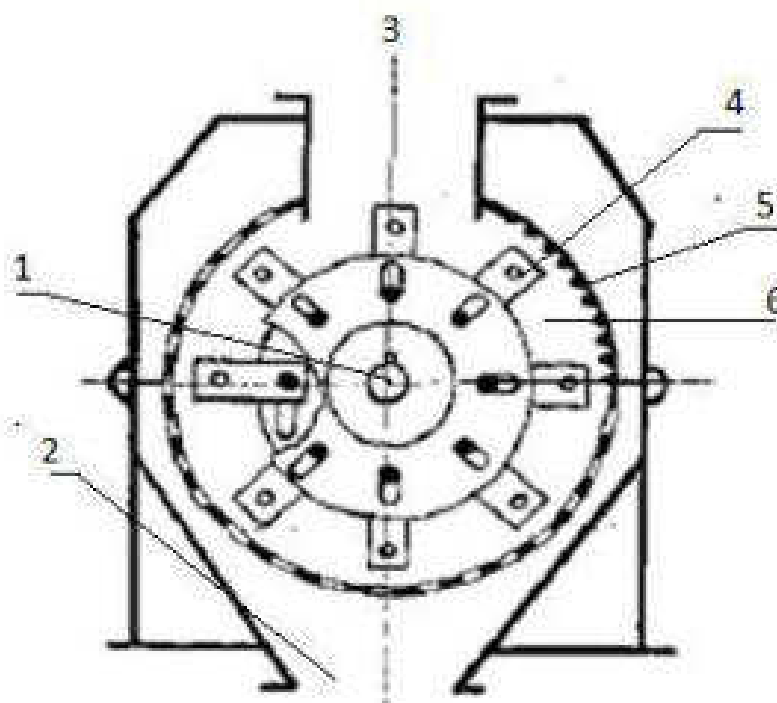
1 – дробильная камера; 2 – ротор; 3 – молотки; 4, 5 – нижняя и верхняя decks;
6 – решето; 7 – окно загрузки; 8 – разрыклители

Рисунок 1.7 – Дробилка зерна (Патент РФ 2568754)

Устройство содержит дробильную камеру, в которой установлены ротор с молотками, нижние и верхние деки, решето. Разрыхлители установлены на границах решета.

Однородный и расслоенный воздушно – продуктовый слой, образовавшись в поперечном сечении, совершает круговые движения внутри камеры, тем самым создает некий недостаток в данной конструкции. Измельченным кормам выход через решето перекрывают крупные фракции, что, в свою очередь, потребляют лишнюю энергию на круговое движение. За счет этого снижается эффективность взаимодействия между измельчаемым зерном и молотками, в итоге, роль решета остается незначительной, это ведет к непроизводительным энергозатратам.

На данном рисунке 1.8 показана решетчатая молотковая дробилка, которую используют в комбикормовой и мукомольной промышленности



1 – ротор; 2 – выходное отверстие; 3 – приемное устройство; 4 – молотки;
5 – дека; 6 – дробильная камера

Рисунок 1.8 - Конструктивно-технологическая схема решетчатой молотковой дробилки (Патент РФ 321283)

Дробилка работает в следующем порядке. Зерно через загрузочное окно попадает в дробильную камеру. В процессе действия молотков измельченное зерно проходит через сито и удаляется из камеры. Также в данной дробилке предусмотрено специальное устройство, которое обеспечивает возможность для регулировки рабочего зазора между поверхностью рабочей камеры и молотками, за счет этого повышается эффективность дробления.

Специально для этого на границах ротора установлены регулировочные кольца. Данные кольца имеют способность перемещаться вокруг оси ротора. В регулировочных кольцах и дисках ротора сделаны пазы, где установлены оси с молотками, они находятся под углом друг другу. Ослабляя болты крепления регулировочных колец и одновременно поворачивая их относительно к крайним дискам ротора дробилки вокруг оси вращения, регулируют рабочий зазор.

Однако эти изменения рабочего зазора не проявляют значительного влияния на размер конечного продукта, как в случае с решетками. Это является их существенным недостатком. Поэтому не выгодно применять в этой конструкции такое устройство.

1.4. Анализ факторов, влияющих на рабочий процесс молотковых дробилок.

Технологическую эффективность работы дробилок можно охарактеризовать степенью измельчения сырья. Потребление и производительность энергии можно рассчитать на 1 т измельчаемого продукта.

От механических и конструктивных особенностей машины зависят основные показатели работы дробилки молоткового типа, такие как, окружная скорость, величина поверхности сита, размер отверстий и их конфигурация и так далее. Большую роль также играют формы молотков, схема установки молотков, и величина от концов молотков до плоскости сита.

В. И. Сыроватка [6] отмечает, что главный параметр дробилки – это диаметр ротора, в значительной степени влияющий на скорость перемещения материала по рабочей плоскости дробильной камеры. Из конструктивных соображений наилучший диаметр ротора должен быть в пределах 300–500 мм.

Масса и размер молотков оказывают большое влияние на производительность, качество дробления и на потребляемую мощность. Максимальное взаимодействие с измельчаемым материалом обеспечивается за счет оптимальной конструкции и правильным расположением молотков.

В работе [7] отмечается, что дробящий результат молотка зависит от его кинематической энергии. Если изменить скорость вращения ротора и массу молотка можно регулировать кинематическую энергию. При условии того, что кинетическая энергия одинакова, дробящий процесс молотка малой массы, вращающегося с высокой скоростью, и молотка большей массы, вращающегося с меньшей скоростью, раздробленная зерновая масса будет отличаться друг от друга.

Большую популярность имеют плоские прямоугольные молотки. Благодаря такой форме можно нанести прямые удары по поступающему в измельчитель сырью. При условии того, что в процессе работают все четыре угла, срок службы молотка увеличивается. Если толщина молотков более 2-3 мм, то эффективность дробления зерна возрастает.

В результате исследований В. И. Шулятьев определил, что с повышением количества молотков безразмерные характеристики воздушного потока увеличиваются. При установке на четырех осях подвеса 100 молотков коэффициенты давления в 4,4 раза, а коэффициенты подачи в более чем в 2,1 раза больше, чем при работе с 28 ножевыми рабочими органами, что свидетельствует о повышении энергии воздушного потока [8].

Расстояние между решеткой и молотками также играет не малую роль, которая влияет на эффективный процесс измельчения зерна. Если расстояние

меньше, то измельчение будет более тонким, но потребление энергии больше. При большом расстоянии молотка и решетки все будет по другому.

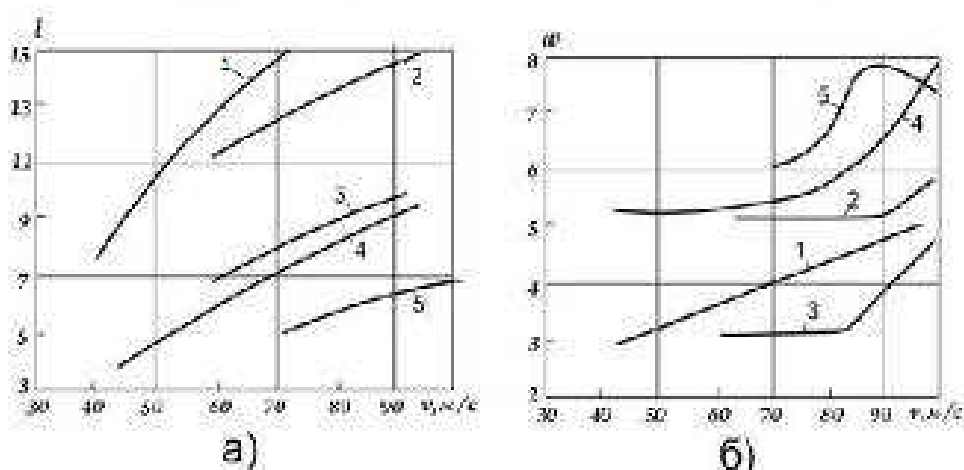
Ученые [9] установили, что наилучший зазор между концами молотков и решетом – 0,0015–0,002 м, между молотками и элементами колосников – 0,0025 м и зазор между молотками и деками – 0,003 м.

В работе [10] говорится, что повышение эффективной площади сита на 5 % приводит к увеличению выхода размольного продукта до 30 %. К тому же увеличение диаметра отверстий решет от 1,5 до 2,0 мм при переработке сухого зерна способствует повышению производительности на 10–15 %, а при переработке сырого зерна – на 20–30 %.

Срок службы сит увеличится при применении толщины сита более 3 мм, но способность просеивания ухудшится. Быстрый прорыв произойдет, если в молотковой дробилке установлена сита толщиной менее 1,5 мм, потому что сита ударного воздействия и интенсивного истирания велики.

1.5. Исследование влияния окружной скорости молотков на степень измельчения и на удельный расход энергии.

Если увеличить окружную скорость молотков, степень измельчения продукта значительно будет возрастать. Когда скорость достигает до 65–80 м/с наблюдается самое наибольшее интенсивное измельчение. При скорости 80–90 м/с удельный расход резко увеличивается (рисунок 1.9).



а) на степень измельчения б) на удельный расход энергии.

1- гречиха, 2- кукуруза, 3- просо, 4- пшеница, 5- овес

Рисунок 1.9 – Влияние окружной скорости молотков

Значительное увеличение расхода энергии при высоких окружных скоростях; молотков объясняется тем, что продукт измельчается в результате истирания, при котором образуются мелкие частицы. Исследования гранулометрического состава измельченных материалов подтверждают это положение. С увеличением зазора между молотками и ситовой поверхностью степень измельчения, например: пшеницы- снижается (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Влияние величины зазора между молотками и декой на интенсивность измельчения.

Расстояние между молотками и ситом, мм	Средневзвешенный размер частиц, мм	Содержание целых зерен, %	Расстояние между молотками и ситом, мм	Средневзвешенный размер частиц, мм	Содержание целых зерен, %
4	0,715	0,02	22	0,979	0,55
16	0,828	0,20	28	0,588	2,30

Увеличение зазора приводит к снижению скорости движения продукта относительно сита, что улучшает его просивание, повышает возможность прохода крупных частиц и целых зерен. Окружные скорости молотков и величина зазора между молотками и ситом связаны между собой. Чем выше окружная скорость молотков, тем больше должен быть, зазор между молотками и ситом.

1.6 Анализ теоретических исследований технологического процесса измельчения зерна.

В формировании единой теории измельчения материалов свой значительный вклад внесли: В.Л. Кирпичев (1874 г.), П. Риттингер (1867 г.), Ф. Кик (1885 г.), Ф. Бонд (1952 г.)

Так, согласно этим теориям, если тело кубической формы с ребром D разрушается любым способом до кубов с ребром d , то число полученных кубиков, очевидно, пропорционально кубу степени измельчения, т. е. поверхность S куба с ребром D :

$$S = D^3/d^3 = \lambda^3, \quad (1.1)$$

где λ - степень измельчения материала

При этом на формирование единицы новой поверхности затрачивается постоянная работа A , которая определяется опытным путем и может быть названа удельной работой. Тогда вся работа (пропорциональна изменению объема или поверхности), затрачиваемая на измельчение рассматриваемого тела, очевидно, будет равна у Риттингера $A_R = K_R D^3$, у Кирпичева и Кика

$$A_{KK} = K_{KK} D^3.$$

В 1928 году производить оценку работе измельчения, принимая во внимание недостатки поверхностной и объемной теорий, предложил П.А. Ребиндер.

$$A = A_V + A_S = k\Delta V + \alpha\Delta S, \quad (1.2)$$

где A_V - работа, которая затрачивается на деформацию в деформируемой части тела;

A_S - работа, которая затрачивается на образование новых поверхностей;

ΔV - деформированная часть тела;

ΔS - вновь образованная поверхность;

k - коэффициент пропорциональности;

α - коэффициент поверхностного напряжения твердого тела.

В 1952 году С.В. Мельников [11, 12], отталкиваясь с главного закона измельчения П.А. Ребиндера, предложил эмпирическую рабочую формулу с целью установления затрат энергии на измельчение:

$$A_{изм} = C_{гр}[C_v + lg\lambda^3 + C_s(\lambda - 1)], \quad (1.3)$$

где $A_{изм}$ - удельная работа измельчения, Дж/кг;

$C_{гр}$ - коэффициент, отражающий влияние неучтенных факторов и обуславливаемый от принципа воздействий рабочих органов и конструктивных особенностей измельчителя;

C_0 , C_1 - постоянные коэффициенты, удельные затраты энергии на упругие деформации и на образование новых поверхностей при измельчении (Дж/кг), определяемые опытным путем.

Найти решение этой проблеме свои работы посвятили, также, зарубежные и отечественные ученые, такие как Г. Румпф, В.Я. Гиршсон, С.Д. Хусид, В.А. Киринчев, Л.Б. Левенсон, И. Брах, А.Р. Демидов и другие ученые. Все теории измельчения направлены на объяснение образования новых поверхностей, определение гранулометрического состава готового продукта, получение заданной степени измельчения в зависимости от затраченной в процессе энергии [13,14, 15].

На рисунке 1.10 представлены главные тенденции теорий и подходов выявления процесса измельчения.



Рисунок 1.10 - Теоретические исследования процесса измельчения

Изучив данные теории, можно уверенно сказать, что все разрушения, в нашем случае это дробление зерна, происходят в связи с напряжением, которое появляется в теле и от критической величины. Как правило эти значения оказываются значительно меньшими, чем результаты теоретических расчетов, основанных на оценке энергии межатомных связей, что объясняется микротрещинами и другими дефектами материалов.

При измельчение материала можно добиться за один или несколько приемов, и каждый раз будут получаться частицы с разным

гранулометрическим составом. Немаловажно, чтобы не было перерасхода энергии, связанный с переизмельчением материала. Требуется больше затраты энергии для измельчения мелких зерен, т.к. на таких частицах меньше внутренних дефектов, следовательно они прочнее. Например: при тонком помоле энергия тратится более 32 кВтч/т, а при крупном помоле расход энергии колеблется от 0,4 до 1 кВтч/т.

Возможность использования технического средства, прочность и крупность материала влияют на величину разрушающего усилия. Определить затрачиваемую при этом энергию очень проблематично, потому что при разных физико-механических свойствах измельченного материала и способах воздействия на сырье изменяется предельная прочность. Согласно данным причинам никакая из теорий не предусматривает воздействие многих факторов на процесс измельчения и энергетику разрушения.

Чтобы оценить качество продукта измельчения обращают внимание на крупность частиц дроблённого зерна, абсолютный размер и на зоотехнические требования. Для того, чтобы дать энергетическую оценку нужно понимать процесс диспергирования, то есть знать об уровне измельчения зернового материала или модуле помола. Благодаря этому дают оценку на качество разделения исходного материала на части нужного размера.

Крупность сыпучих материалов оценивают по содержанию в них фракций определенных размеров, то есть опять же по гранулометрическому составу. Благодаря графическому изображению гранулометрического состава продуктов измельчения можно характеризовать крупность, показать распределение измельченного продукта по классам и оценить эффективность работы измельчающей машины.

В животноводческих фермах и на заводах, изготавливающие комбикормы, степень измельчения и модуль помола оценивают при помощи ситового анализа и решетчатых классификаторов. Измельченный материал просеивают через набор сит, где у каждого конкретный размер ячеек.

Благодаря приобретенным сведениям, формируют значение модуля помола. Высокий уровень статистической устойчивости распределения зерновой дерти по их размерам дает достаточное основание применить для оценки ее крупности критерий, как содержание в пробе одного класса, о котором определяют по остатку (фракции) на одном из сит [16, 17]:

Зная средний размер d частиц продукта измельчения и данными по среднему размеру D частиц исходного материала определяют степень его измельчения

$$\lambda = \frac{D}{d} \quad (1.4)$$

Коэффициент степени измельчения характеризует главным образом технологический процесс разделения материала на части, а не крупность частиц готового продукта. Очевидно, что при одном и том же d , степень измельчения будет большей или меньшей в соответствии со значением D .

1.7 Цель и задачи исследования

Цель данной диссертации: Исследование процесса дробления зерна в молотковой дробилке ЗУБР-1.

Задачи исследования:

1. Изучить требования к качеству измельченных кормов;
2. Проанализировать существующие технологии измельчения зерна и конструкции для дробления;
3. Рассчитать конструктивные и технологические параметры молотковой дробилки ЗУБР-1;
4. Теоретически исследовать влияние конструктивных и технологических параметров рабочего процесса молотковой дробилки на производительность и энергоемкость процесса измельчения;
5. Экспериментально исследовать влияние конструктивных параметров молотковой дробилки на качественные и энергетические показатели готового продукта.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Факторы, влияющие на процесс дробления

Измельчением называется процесс механического разделения твердого тела на части. Благодаря трем основным характеристикам можно определить технологический результат работы дробилки:

- 1) по размеру измельченных частиц;
- 2) по форме;
- 3) по распределению частиц по классам определенных размеров;

Процесс дробления широко распространен в технике и науке, но, несмотря на это, теоретически мало изучен и не до конца освоен. В наши дни на современных измельчающих машинах нельзя достичь определенных размеров. Также нет возможности распределить по размерным классам частиц измельченного материала и дать определение точной форме. Это объясняется тем, что есть факторы, которые влияют на процесс дробления.

Перечислим главные факторы, которые влияют на процесс дробления

1) свойства материала: прочность, твердость, вязкость, однородность, состояние и вид поверхности, степень влажности, размеры, форма и взаимное расположение дробимых кусков, коэффициент трения между частицами материала и другие;

2) свойства дробильной машины: форма и состояние дробящей поверхности, ее скорость и характер движения, масса рабочего органа (соотношение масс рабочего органа и материала), коэффициент трения рабочей поверхности по материалу и другие.

Из-за высокого количества затрачиваемой энергии и износа рабочих частиц дробление считается весьма дорогостоящим технологическим процессом. Имеется основное правило дробления зерна – не измельчать лишнее.

Соблюдение такого правила приводит :

- 1) к уменьшению расхода энергии;

- 2) к увеличению производительности;
- 3) к уменьшению износа рабочих частей машины.

От образования пыли можно избежать точным дроблением до заданных размеров. Пыль увеличивает износ машины, оказывает большое влияние на расход энергии, увеличивается трение, а также усложняет обслуживание. Она очень вредна как людям, так и животным, потому что идет засорение дыхательных путей. Существенная часть потери продукта совершается из-за пыли. Пыль представляет собой в значительной степени потери продукта. Мучная, сахарная, угольная, алюминиевая пыль также, как и пыль многих других материалов, не способных к легкому воспламенению, взрывоопасна. Например, алюминиевая, магниевая и другая металлическая пыль также, как и мучная, может при взаимодействии с кислородом воздуха воспламеняться и взрываться от нагревательных приборов, электрической искры рубильника и других. Взрывы пыли чрезвычайно разрушительны, предупреждение их основано на эффективной вентиляции и правильной организации производства.

Дробление может быть не только сухое, но и мокрое (смачивание дробимого материала водой). При мокром дроблении вместо пыли образовывается шлам, условия работы благодаря этому более гигиеничны и безопасны, так как устраняется запыление воздуха и исключается возможность взрывов.

С целью достижения более точного дробления используют сортирующие устройства, при помощи которых направляют слишком крупные куски назад в дробильную машину (дробление замкнутым циклом).

Современное состояние теории еще не дает оснований к аналитическому расчету пропускной способности дробильных устройств.

2.2. Расчет молотков дробилки.

2.2.1 Расчет размеров молотков.

Размеры молотков выбирают таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\rho^2 = c \cdot l, \quad (2.1)$$

где ρ – радиус инерции массы молотка относительно оси подвеса, м^2 ;

c – расстояние от оси подвеса до центра тяжести молотка, м ;

l – расстояние от оси подвеса до линии действия удара, м .

Причем, направление реакции ударного импульса должно быть перпендикулярным прямой, проведенной через центр отверстия и центр тяжести молотка, т.е. рабочая кромка должна быть параллельна этой прямой.

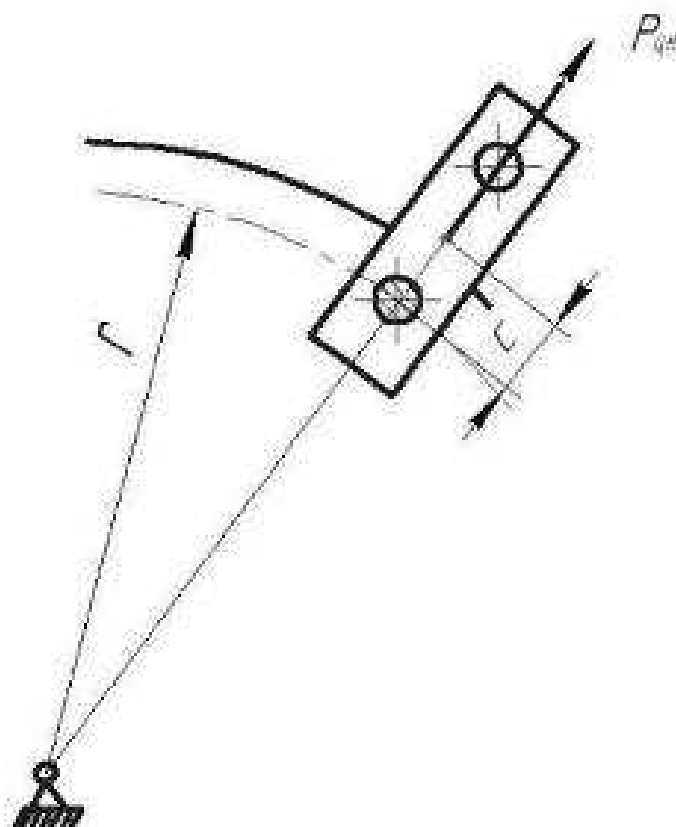


Рисунок 2.1 – К расчету молотка

Выполнение указанных условий обеспечивает уравновешенность молотка на удар.

Для обеспечения устойчивого движения молотка в процессе работы, необходимо чтобы не выполнялось следующее условие:

$$\omega^2 - \frac{g}{2 \cdot r} < \frac{4 \cdot m_M \cdot c \cdot r}{J} \omega^2 < \omega^2 + \frac{g}{2 \cdot r}, \quad (2.2)$$

где ω – угловая скорость ротора, рад/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$J = m_M \cdot \rho^2$ – момент инерции молотка относительно оси подвеса, кг.

$r = \frac{D}{2} - l$ – расстояние между осью ротора и осью подвеса молотка, м;

m_M – масса молотка, кг.

При выполнении этого неравенства необходимо увеличить расстояние между осью ротора и осью подвеса молотка и уменьшить длину молотка и/или, наоборот (в зависимости от конструкции дробилки), и повторять расчет, пока не будет выполняться условие (2.2), причем величина $r + l = D/2$ должна оставаться постоянной.

Для пластинчатых молотков прямоугольной формы с одним отверстием (одна из самых распространенных конструкций), квадрат радиуса инерции его относительно оси подвеса определяют по формуле:

$$\rho^2 = \rho_c^2 + c^2, \quad (2.3)$$

где $\rho_c^2 = \frac{a^2 + b^2}{12}$ – квадрат радиуса инерции молотка относительно его центра тяжести, м²;

a и b – соответственно длина и ширина молотка, м.

Полагая, что точка удара располагается на конце молотка, можно записать

$$l = c + 0,5a \quad (2.4)$$

$$c = \frac{a^2 + b^2}{6 \cdot a} \quad (2.5)$$

Для молотков с двумя отверстиями

$$\rho_c^2 = 0,5 \cdot a \cdot c \quad (2.6)$$

а значение c можно определить из выражения

$$c^2 \cdot \left(\frac{a^2 b}{\pi d} - \frac{a}{2} \right) e^{-\frac{a b (\alpha^2 + b^2)}{6 \pi d^2}} - \frac{d^2}{8} = 0 \quad (2.7)$$

где d – диаметр отверстий, м (можно ориентировочно принять 15...25 мм).

2.2.2 Расчет на прочность молотка дробилки

Расчет на прочность можно провести, рассчитав размер молотка и диаметр отверстия в нем под ось. Расчет выполняют с учетом центробежной силы на разрыв по сечению *I-I*, на срез по сечению *II-II* и *III-III* и на смятие по площади прилегания внутренней плоскости отверстия к его оси (рисунок 2.1).

Условие прочности молотка на разрыв

$$\sigma_p = \frac{P_{\text{цн}}}{(b-d) \cdot \delta} \leq [\sigma_p] \quad (2.8)$$

где $[\sigma_p] = \frac{\sigma_{\text{в}}}{n \cdot K_b}$ – допускаемое напряжение, Па;

$\sigma_{\text{в}}$ – предел прочности, Па;

$n=2$ – запас прочности;

$K_b=2,2$ – коэффициент концентрации напряжений.

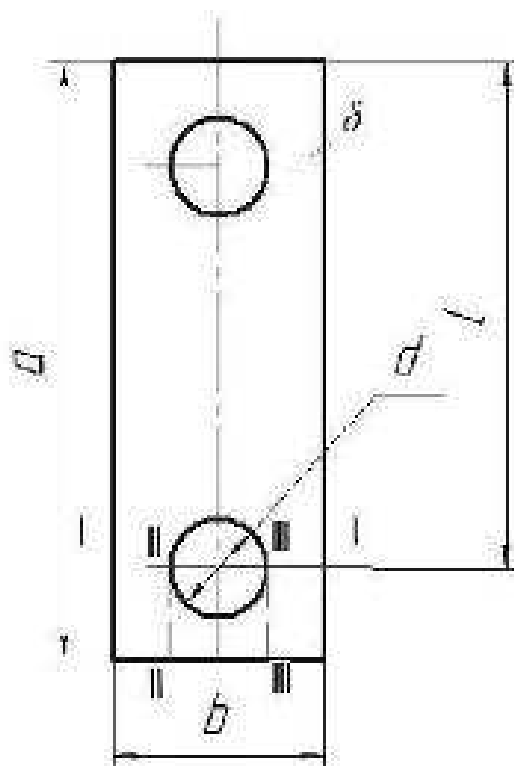


Рисунок 2.2 – Опасные сечения молотка

Условие прочности молотка на сдвиг:

$$\tau_c = \frac{P_{\text{ум}}}{F_c} \leq [\tau_c] \quad (2.9)$$

где $F_c = 2(a - l - d/2)$

δ – площадь сдвига по сечениям II-II и III-III, м².

Условие прочности на смятие

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{P_{\text{ум}}}{K_{\text{м}} d \delta} \leq [\sigma_{\text{см}}], \quad (2.10)$$

где $K_{\text{м}} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий форму сечения оси.

При невыполнении хотя бы одного из условий прочности, нужно взять более прочный материал и повторить расчет.

2.3 Расчет теоретической производительности и определение действительной производительности дробилки

Большинство факторов, такие как влажность продукта, степень измельчения, режим работы дробилки и т.д. имеют влияние на производительность молотковых дробилок.

Производительность можно определить практическими и теоретическими способами. Практически производительность определяется по данным испытания, путем деления веса порции зерна поданной в дробилку на время, затраченное на ее дробление с участием молотков, дек и решета.

Теоретически производительность Q , кг/ч, определяют по формуле:

$$Q = \frac{60n_3q_0}{1000}, \quad (2.11)$$

где q_0 – вес тысячи штук зерен, кг;

n_3 – количество исходных частиц (зерен), раздробленных за 1 мин до установленной степени измельчения:

$$n_3 = \frac{Z_n}{\lambda}, \quad (2.12)$$

где λ – степень измельчения;

Z_n – число вероятных ударов, наносимых молотками по частицам продукта во взаимодействии с рифлями дек и решетом в предположении, что каждое соударение делит частицы продукта пополам

$$Z_n = Z_m(K_1 + K_2 + K_3)n_s, \quad (2.13)$$

где Z_m – количество молотков на барабане, шт;

K_1 – число ударов молотка (вероятное) влет за один оборот барабана, равное 1;

K_2 – число рифлей на деках, шт.;

K – число ударов молотка по слою продукта, находящемуся на решете за один оборот барабана, равное 1;

n – частота вращения барабана (мин⁻¹).

Число ударов согласуется со временем воздействия рабочих органов на перерабатываемый продукт, определяемым по формуле

$$t = \frac{Q_{\text{ззр}}}{Q} \quad (2.14)$$

где $Q_{\text{ззр}}$ – вес зерна, находящегося в камере дробления, кг;

Q – производительность дробилки, кг/с.

Затраты энергии отдельного молотка определяют исходя из запаса полной его кинетической энергии и распределения ее при ударе для разных соотношений масс молотка и частиц продукта. Изменение окружной скорости молотка в результате удара по продукту с различной массой частиц определяется по формуле:

$$V = \frac{V_0}{1 + \frac{m}{M}}, \quad (2.15)$$

где V_0 – окружная скорость,

м/с; m – масса частиц продукта до дробления, кг;

M – масса молотка, кг.

Полная кинетическая энергия молотка равна:

$$A_0 = \frac{MV_0^2}{2}, \quad (2.16)$$

$$A_0 = 9,81 \frac{MV_0^2}{2} \quad (2.17)$$

Кинетическая энергия молотка при ударе, затрачиваемая на деформацию частиц продукта, их отбрасывание и часть энергии, остается

неиспользованной, так как после ударов барабан с молотками продолжает вращение без заметного снижения скорости вращения:

$$A_0 = A_1 + A_2 + A_3 \quad (2.18)$$

где A_1 – кинетическая энергия, затрачиваемая на деформацию (дробление) продукта:

$$A_1 = \frac{M}{2} V_0 (V_0 - V); \quad (2.19)$$

$$A_1 = 9,81 \frac{M}{2} V_0 (V_0 - V) \quad (2.20)$$

где V – окружная скорость молотка после удара, м/с;

A_2 – кинетическая энергия, затрачиваемая на отбрасывание частиц продукта во время удара, равна:

$$A_2 = \frac{M}{2} V (V_0 - V); \quad (2.21)$$

$$A_2 = 9,81 \frac{M}{2} V (V_0 - V) Дж(НМ); \quad (2.22)$$

$$A_3 = \frac{MV^2}{2}; \quad (2.23)$$

$$A_3 = 9,81 \frac{MV^2}{2} Дж(НМ) \quad (2.24)$$

2.4 Расчет мощности, потребной для процесса измельчения в молотковой дробилке

Согласно рабочему процессу внутри дробильной камеры молотковой дробилки, подводимая к ротору энергия, расходуется на преодоление вредных сопротивлений, а также на процесс измельчения и на перемещение массы материала в дробильной камере, то есть полная мощность, затрачиваемая на измельчение, определяется по формуле:

$$P = P_{\text{под}} + P_{\text{и}} + P_{\text{ц}} + P_{\text{х.х}}, \quad (2.25)$$

где $P_{\text{под}}$ – мощность, расходуемая на процесс подачи измельчаемого материала к рабочим органам молотковой дробилки, кВт;

$P_{\text{и}}$ – мощность, расходуемая на измельчение материала, кВт;

$P_{\text{ц}}$ – мощность, расходуемая на циркуляцию воздушно-продуктового слоя, кВт;

$P_{\text{х.х}}$ – мощность, затрачиваемая на холостой ход ротора с молотками, кВт.

Расход мощности на измельчение определяется по формуле:

$$P_{\text{и}} = Q A_{\text{и}}, \quad (2.26)$$

где $A_{\text{и}}$ – работа, расходуемая на измельчение 1 кг материала, Дж/кг.

Сумма мощностей на циркуляцию $P_{\text{ц}}$ и холостой ход $P_{\text{х.х}}$ выбирается по опытным данным в размере 15 ... 20% от мощности на измельчение $P_{\text{и}}$:

$$P_{\text{ц}} + P_{\text{х.х}} = (0,15 \dots 0,2) P_{\text{и}} \quad (2.27)$$

Энергоемкость процесса измельчения в молотковой дробилке с учетом степени измельчения и качества готового продукта рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{P K_{\text{к}}}{Q \lambda}, \quad (2.28)$$

где P – мощность, расходуемая на рабочий процесс молотковой дробилки с учетом затрат энергии на весь технологический процесс, кВт;

Q – производительность молотковой дробилки, кг/ч;

λ – степень измельчения;

$K_{\text{к}}$ – коэффициент качества готового продукта, характеризующий отношение недонизмельченных и переизмельченной массы материала к общей массе готового продукта.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

3.1. Программа экспериментальных исследований

В соответствии с поставленными задачами и результатами теоретического описания процесса измельчения программ предусматривает: определения количественных и качественных показателей дробления фуражного зерна, определение производительности дробилки и удельного расхода электроэнергии от размера отверстий решета.

3.2 Методика определения модуля помола зерна

Благодаря анализу, проведенному с помощью сита на решетной классификаторе, можно рассуждать о качестве помола. Показатель, с помощью которого можно оценить тонкость помола в соответствии с ГОСТом 8770-58, является средневзвешенный диаметр частиц (модуль), определяемый по формуле:

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

где M - модуль помола, мм;

G_0 - масса навески на дне классификатора, G_1, G_2, G_3 - масса навесок на ситах с отверстиями диаметром соответственно 1,2 и 3 мм, г.

Помол считается

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

Работу дробилки определяют согласно степени измельчения зернового материала, определяемой из выражения:

$$\lambda = \frac{D_3}{d_{cp}} \quad (3.2)$$

где d_{cp} - средневзвешенный диаметр частиц (модуль) измельченного зерна.

D_3 - диаметр шара объемом, равным объему одного зерна, называемый эквивалентным диаметром зерна.

В соответствии с данными С.В. Мельникова, для расчета можно принять значение D_3 для пшеницы равным 3,8 мм, ржи – 3,3 мм, овса – 3,7 мм, ячменя – 4,2 мм. Из за сложной формы, непросто определить удельную площадь поверхности зерна. Использование эквивалентного диаметра D_3 даёт возможность вычислить удельную площадь поверхности зерна.

Эквивалентный диаметр можно выявить следующим образом.

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

Из подготовленной пробы разделяют две навески зерна по 5 г и от каждой отбирают по 100 зерен. Взвешивают выделенные 100 зерен и определяют среднюю массу одного зерна.

Выделенные 100 зерен помещают в подготовленный с керосином мерный цилиндр, сравнивают отметку керосина до и после погружения. Придерживаясь этим данным, находят средний объем зерна V_3 , см³

Опыт по определению среднего объема одного зерна V_3 над другой партией с 100 зернами также проводят по определению среднего объема одного зерна и для расчетов используют среднее значение из этих двух исходов.

По рассчитанному значению объема одного зерна вычисляют эквивалентный диаметр зерна D_3 по формуле:

$$D_3 = 1.24 \sqrt[3]{V_3} \quad (3.3)$$

По выявленному значению D_3 определяют удельную площадь поверхности S_H , $\text{см}^2/\text{г}$ исходного (начального) зернового материала по формуле:

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

где ρ – плотность зерна, $\text{г}/\text{см}^3$.

3.3 Методика определения удельного расхода электроэнергии на процесс дробления

Значимость удельного расхода энергии на образование единицы новой поверхности при дроблении зерна важна, как и при определении удельного расхода энергии на дробление единицы зерна.

В этом случае интерес проявляют на качество измельчения зерна и на результат самого процесса дробления. Поэтому для определения затрат на процесс дробления рассчитывают расход полезной энергии на образование единицы новой поверхности по формуле:

$$A = \frac{P_d - P_{xx}}{Q \Delta S} \quad (3.5)$$

где A – это удельный расход энергии, $\text{Дж}/\text{м}^2$;

P_d – это мощность на валу ротора дробилки при дроблении, Вт;

P_{xx} – это мощность холостого хода дробилки, Вт;

ΔS – это приращение удельной площади поверхности, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Значение P_d принимаем согласно технической характеристики; P_{xx} принять 15% установленной мощности двигателя. Производительность дробилки, $\text{кг}/\text{с}$, определяют по формуле:

$$Q = G/t, \quad (3.6)$$

где G – масса измельченного за время опыта зерна, кг;

t – продолжительность опыта, с.

Для энергетической характеристики процесса дробления следует определить величину удельного расхода полезной энергии на единицу массы по формуле:

$$A_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{д}} - P_{\text{д.к}}}{Q} \quad (3.7)$$

где $A_{\text{уд}}$ – удельный расход энергии на единицу массы, Дж/кг.

3.4 Определение производительности

Производительность машины является важным показателем работы машины.

Производительность определяют в момент установившегося движения. Установившийся режим работы – это такой период работы, когда все количество поступившего зерна в камеру дробления равно количеству выходящего из камеры измельченного продукта в единицу времени. Время определяется исходя из показателей амперметра и индикатора. После установления стрелки прибора на заданном делении включались соответствующие приборы и замерялись показания рабочего процесса.

Часовую производительность определяли по формуле

$$Q = 3600M/t, \quad (3.8)$$

где Q – это производительность кормодробилки, кг/ч;

M – это масса отобранной пробы, кг;

t – это время отбора пробы, с.

Взвешивание отобранных проб производили на весах ВП-50 с точностью до 0,01кг.

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

Окружную скорость молотков можно определить по формуле:

$$V = \pi \cdot R \cdot n / 30, \quad (3.9)$$

где V – это окружная скорость, м/с;

R – это расстояние от вершины молотка до
оси ротора;

n – это частота вращения диска, .

При определенном режиме работы дробилки, частоту вращения ротора определяли с помощью тахометра.

Частоту вращения ротора дробилки варьировали, изменяя частоту вращения электродвигателя с помощью векторного преобразователя частоты тока MFC 710.

Определение работы при измельчении продуктов затрачивается на:

- 1) отделение внутренних поверхностей измельчаемых частиц;
- 2) внутреннее трение частиц при их измельчении;
- 3) трение, возникающее между рабочими поверхностями и продуктом;
- 4) трение движущихся частей машины и другие механические сопротивления.

При таких разных направлениях, из за которых расходуется энергия при дроблении, очень сложно выявить единую формулу, чтобы подчитать энергию при этом процессе.

Несмотря на это, в течении долгого времени, изучая процесс измельчения, смогли выявить две основные теории о дроблении, которые были разработаны Риттингером и Кнхом.

Как в своей теории исходит из расчета работы, необходимой для деформации измельчаемого продукта.

Из теории упругости известно, что работа деформации при сжатии равна:

$$A = \frac{V \cdot \sigma}{2 \cdot \epsilon}, \quad (3.10)$$

где (σ) — это возникающее при деформации напряжение;

(ϵ) — это модуль упругости (для зерна 1000—5000 кг/см²);

(V) — это объем измельчаемого тем.

По теории Кика усилие, которое необходимо для измельчения сырья, определяют следующим образом.

Из приведенной формулы следует, что отношение работы, потребной для измельчения пропорционального объему измельчаемой частицы продукта:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{a_1}{a_2}, \quad (3.11)$$

где (a_1) и (a_2) — это линейные размеры частицы.

С другой стороны, работа равняется произведению силы на путь, поэтому

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{P_1 \cdot S_1}{P_2 \cdot S_2}, \quad (3.12)$$

где (P_1) и (P_2) — это усилия измельчения;

(S_1) и (S_2) — это соответствующие абсолютные деформации.

По закону Гука деформация тела пропорциональна его линейным размерам:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{a_1}{a_2}, \quad (3.13)$$

Подставляя в равенство вместо отношения деформаций отношение линейных размеров, получаем:

$$\frac{A_1}{A^2} = \frac{P_1 \cdot a_1}{P_2 \cdot a_2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (3.14)$$

откуда

$$\frac{P_1}{P^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad (3.15)$$

Исходя из теории Кинка, можно сделать вывод, что сделанная работа по измельчению пропорциональна объему измельченного продукта, а усилия измельчения пропорциональны площади поперечного сечения этого продукта.

4. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценивают технологическую эффективность молотковых дробилок по их производительностью, удельным расходом потребления энергии и степенью дробления зерна. Эффективность работы дробилки зависит от разных параметров рабочих органов, например, такие как, размер и форма, качество, окружная скорость молотка, форма сита и размеры ее отверстий, величина зазора между верхней кромкой молотков и ситовой поверхностью, а также не малую роль играет физические свойства сырья (влажность, крупность, твердость, прочность и так далее).

Нашими основными задачами исследования стали изучение воздействия разных конструктивных и технологических параметров устройства дробилки на качество измельчения, т.е. на модуль помола M , на производительность, на пропускную способность Q .

4.1 Исследование влияния диаметра отверстий решет на модуль помола.

Исследование влияния размера отверстий сит на гранулометрический состав смеси проводили на молотковой дробилке типа Зубр-1 с пластинчатыми молотками (рисунок 4.1). Схема расстановки молотков соответствовала паспорту на дробилку. В качестве измельчаемого продукта использовались: пшеница, ячмень, горох влажностью 15%, количество сорной примеси в нем составляло менее 1%.



Рисунок 4.1 – Общий вид зернодробилки Зубр-1.

В дробилке были установлены сита с отверстиями диаметром 2,4 и 6 мм (Рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 –Сменные решета с диаметром отверстий 2,4 и 6 мм.

Для определения модуля помола нами был использован ситовый классификатор, представленный на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 - Ситовый классификатор

С целью определения модуля помола была взята навеска из полученного материала после дробления зерна в разных решетках. Для определения массы навески использовались - весы электронные настольные.



Рисунок 4.4 – Процесс взвешивания семян

Для определения модуля помола были использованы металлические сита четырёх размеров отверстий:

- Второе сито – 1,0 мм;
- Третье сито – 2,0 мм;
- Четвертое сито – 3,0 мм.

Влияния диаметра отверстий решет на модуль помола отражает зависимость, представленная на рисунке 4.5.

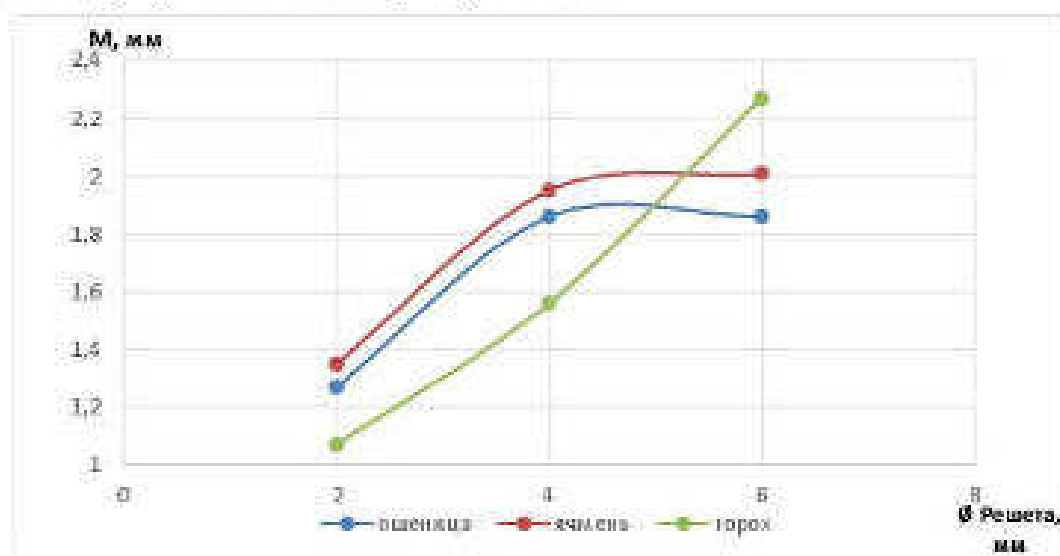


Рисунок 4.5 - Влияния диаметра отверстий решет на модуль помола.

Из экспериментальных данных видно, что при изменении диаметра решета от минимального 2 мм до максимального 6 мм модуль помола изменился от 1,07 до 2,27.

При использовании сита с размером отверстия 2 мм модуль помола у пшеницы составляет 1,26 мм, а у ячменя 1,35 мм. Если использовать решета размером 4 мм модуль помола у пшеницы достигло до 1,86 мм, у ячменя 1,95 мм. Использование 6 мм ситы не дало существенных отличий по сравнению с 4 мм.

Как ранее было сказано, качество дробления зависит и от вида зерна. По графику можно сделать вывод, что модуль помола гороха отличается от других зерен. При использовании сита размером 2 мм модуль помола у гороха равен 1,07 мм, а при использовании сита размером 6 мм составляет

2,27 мм, что является самым крупным размером модуля помола по сравнению с другими.

4.2 Исследование влияния количества молотков на технические показатели работы дробилки.

Многие авторы исследовали вопрос количества молотков в дробилке, и как они влияют на рабочий процесс молотковой дробилки. Для того что бы выявить количество молотков и влияние их на рабочий процесс, нами были проведены эксперименты.

Что бы провести анализ были взяты данные, полученные экспериментальным путем. Эксперименты выполнялись на четырех (рисунок 4.6) и двух (рисунок 4.7) пакетах молотков при диаметре сита 2 мм.



Рисунок 4.6 – Зернодробилка с четырьмя пакетами молотков



Рисунок 4.7 – Зернодробилка с двумя пакетами молотков

На основании проведенных экспериментов была получена зависимость, представленная на рисунке 4.8.

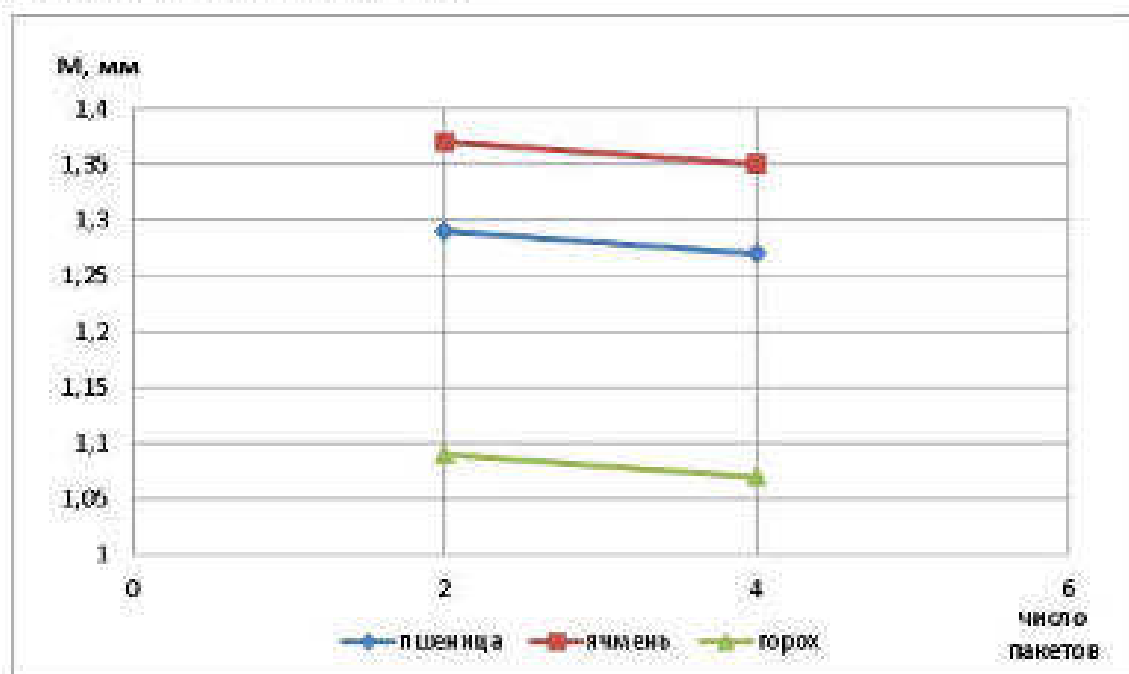


Рисунок 4.8 - Влияние числа молотков на модуль помола

Проанализировав график, мы пришли к выводу, что с увеличением количества пакетов модуль помола снижается. Так при дроблении гороха, при установке 2 пакетов молотков модуль помола составляет 1,09 мм, а при установке 4 пакетов молотков модуль помола составляет 1,07 мм.

При дроблении ячменя картина была аналогична, при работе на двух пакетах молотков модуль помола составляет 1,35 мм, при увеличении их до четырех наблюдается снижение до 1,37 мм соответственно в 0,2 раза меньше.

Изменение числа молотков так же оказывает влияние на гранулометрический состав готового продукта.

4.3. Исследование влияния диаметра отверстий решет на производительность при постоянной мощности

Исследование влияния размера отверстий сит на количественные показатели процесса измельчения проводили на молотковой дробилке типа Зубр 1 с пластинчатыми молотками. Схема расстановки молотков соответствовала паспорту на дробилку. В качестве измельчаемого продукта использовался пшеница, ячмень и горох. Количество сорной примеси составляло менее 1%. В дробилке были установлены сита с отверстиями диаметром 2, 4 и 6 мм. Во время измельчения поддерживалась номинальная мощность электродвигателя (1800 Вт).

Графики зависимости производительности дробилки от диаметра отверстий сита представлены на рисунке 4.9.

Как видим, производительность дробилки при измельчении пшеницы, ячменя и гороха практически линейно зависит от размера отверстия сит и находится в пределах от 33 до 166,2 кг/ч.

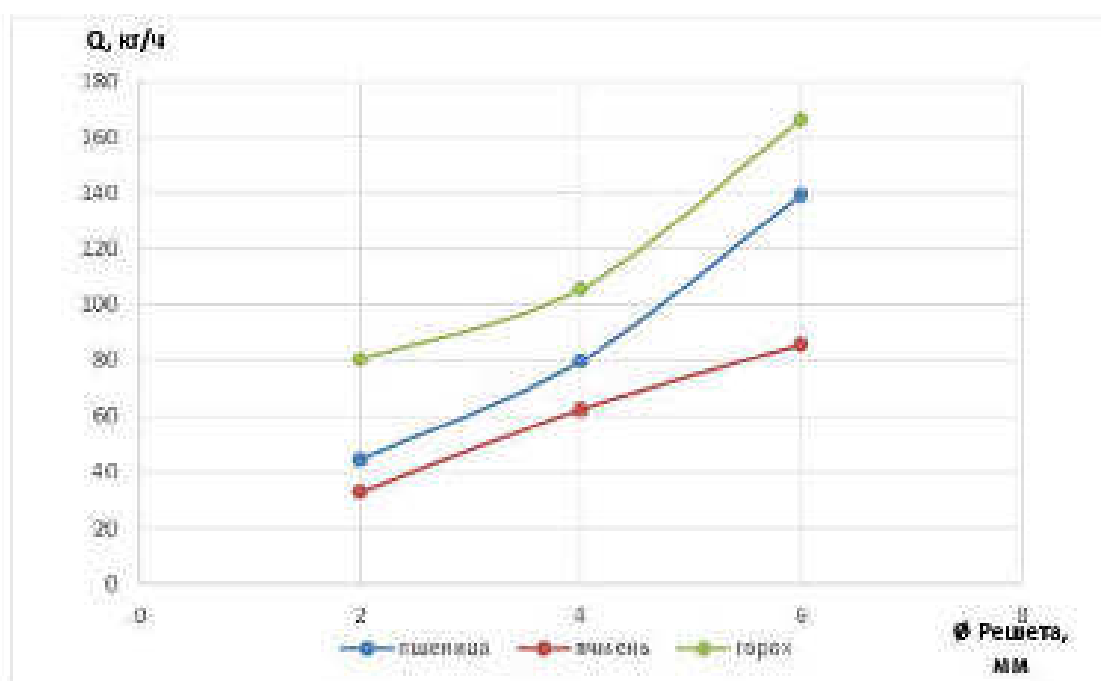


Рисунок 4.9 - Влияние диаметра отверстий решет на производительность

Рассмотрим на примере пшеницы: при использовании сита с размером отверстия 2 мм производительность равна 44,4 кг/ч, а при размере сита 4 мм производительность увеличилось до 79,8 кг/ч. Максимального результата 139,2 кг/ч добились благодаря сити с размером отверстия 6 мм.

При дроблении гороха на сите 2 мм производительность равна 80,4 кг/ч, а при использовании сита размером 6 мм производительность увеличивается до 166,2 , что соответственно 85,8 раза больше.

4.4 Исследование удельного расхода электроэнергии на процесс дробления

Этот показатель является одним из основных, определяющих технологические свойства зерна. Расход энергии определяется структурно-механическими свойствами зерна и организацией процесса измельчения, а также зависит от конструкции измельчающих машин.

Исследование влияния размера отверстий сит на определение удельного расхода электроэнергии проводили на молотковой дробилке типа Зубр 1 с пластинчатыми молотками. В качестве измельчаемого продукта

использоваться пшеница, ячмень и горох. В дробилке были установлены сита с отверстиями диаметром 2, 4 и 6 мм. Во время измельчения поддерживалась номинальная мощность электродвигателя (1800 Вт).

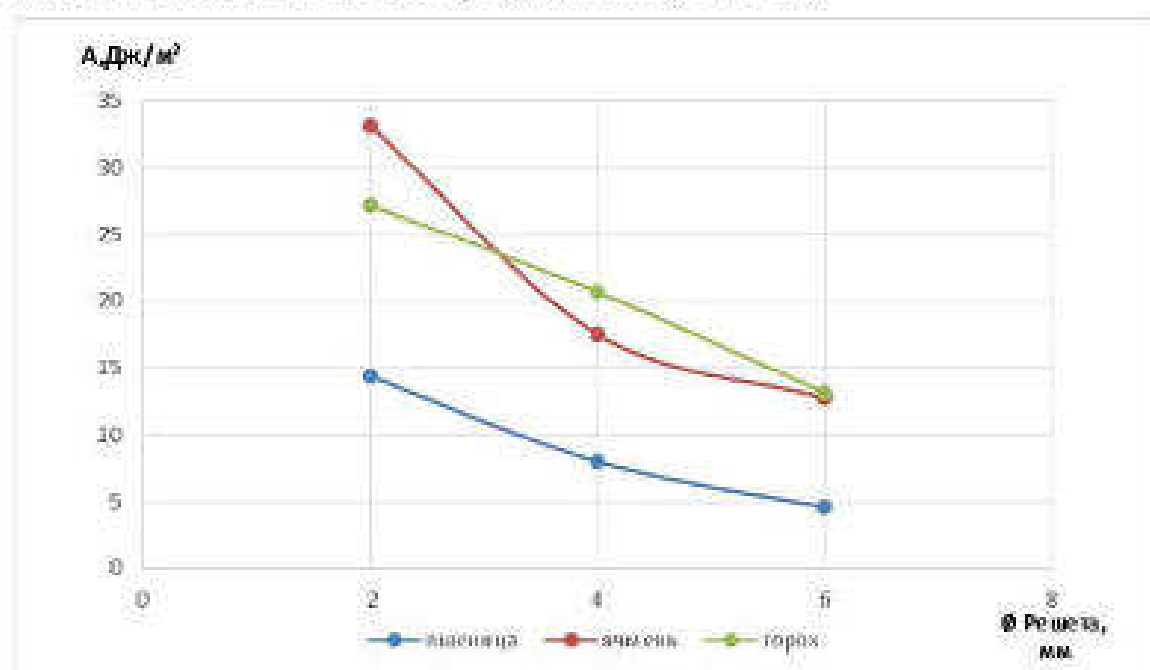


Рисунок 4.10 - Влияние диаметра отверстий решетки на удельный расход электроэнергии.

Проанализировав полученные зависимости, можно сделать вывод: чтобы сократить удельный расход электроэнергии нужно использовать сита с более крупным диаметром отверстий. Так при дроблении гороха, при установке сита размером отверстий 2 мм, удельный расход электроэнергии составляет $27,18 \text{ Дж/м}^3$, а при установке сита размером отверстий 6 мм, расход электроэнергии уменьшается до $13,15 \text{ Дж/м}^3$. Самую высокую потребность в электроэнергии у культуры ячмень $33,11 \text{ Дж/м}^3$ при сите с размером отверстий 2 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации) нами были проанализированы теоретические исследования процесса дробления зернового материала и существующие конструкции устройств для дробления зерна, используемые в сельскохозяйственном производстве.

Для проведения научных исследований по определению модуля помола, производительности и удельного расхода электроэнергии была использована молотковая кормодробилка Зубр – 1.

При исследовании измельчения зерна в кормодробилке выявили, что диаметр отверстий решета оказывает существенное влияние на гранулометрический состав готового продукта, что позволяет варьировать модулем помола в широких пределах при прочих равных условиях. Для получения готового продукта с размером частиц от 1 до 1,3 мм рекомендуется использовать решета с диаметром отверстий 2 мм, а для получения более крупного помола использовать сита размером 4 или 6 мм. Так же мы выявили, что изменение количества пакетов молотков существенно влияет на модуль помола. Так при дроблении пшеницы с двумя пакетами, модуль помола составил 1,29 мм, а при использовании четырех пакетов уменьшился до 1,26 мм.

Исследования показали, что производительность можно контролировать благодаря сменным решетам с разными диаметрами отверстий. Используя сита с диаметром отверстия 6 мм можно добиться увеличения производительности до 50% по сравнению с диаметром отверстия 2 мм. Так же были получены зависимости удельного расхода электроэнергии на процесс дробления. Исходя из расчетов на примере пшеницы, мы выявили, что удельный расход электроэнергии уменьшается до $4,57 \text{ Дж/м}^3$, при использовании сита с размером отверстия 6 мм. Тем самым можно сделать вывод, что чем больше диаметр отверстий, тем меньше расход электроэнергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинов, Г. И. Измельчение мясного сырья в звероводстве / Г. И. Малинов, Т. А. Гаврилов, В. Ф. Кондрашов, Л. А. Черняев, Л. С. Паталайнен. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. – 63 с.
2. Гаврилов, Т. А. Исследование эффективности работы оборудования для тонкого измельчения мясо-рыбных кормов / Т. А. Гаврилов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №03(087). – С. 367–377. – IDA [article ID]: 0871303028. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/28.pdf>.
3. Сыроватка В.И. Исследование процесса измельчения зерна ударом // Тракторы и сельхозмашины. - 1962. - № 11. - С.27-29
4. Сыроватка В.И. Исследование процесса измельчения зерна ударом // Тракторы и сельхозмашины. - 1962. - № 11. - С.34-36
5. Патент на полезную модель 151368 U1 RU, МПК В02С13/00. Модернизированная дробилка для зерна / В.И. Широбоков, В.А. Жигалов, О.С. Фёдоров, Ю.А. Ясафов, А.Н. Бастригов - Опубл. 10.04.2015.
6. Сыроватка В. И. Работа молотковых дробилок. // Механизация и электрификация сельского хозяйства : Работы молодых ученых. М. : Колос, 1968. № 1. С. 202–211.
7. Барабашкин В. П. Молотковые и роторные дробилки. 2-е изд. М. : Недра, 1973. 144 с.
8. Шулятьев В. Н. Повышение эффективности функционирования нагнетателей-преобразователей технологических линий и технических средств в молочном скотоводстве : дис. д-ра техн. наук: 05.20.01/ Шулятьев Валерий Николаевич. Киров, 2004. 485 с.

9. Сысуев В. А., Алешкин А. В., Савиных П. А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: В двух томах. Киров : Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2008. Т. 1. 640 с.
10. Хусид С. Д. Измельчение зерна на молотковых мельницах. М. : Заготиздат, 1947. 128 с.
11. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / Л.: Колос, Ленинградское отделение. – 1978. – 560 с.
12. Сергеев Н.С. Центробежно – роторные измельчители фуражного зерна. дисс. док. тех. наук. Челябинск, 2008.
13. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. / С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – М.: Недра. – 1980. – 415 с.
14. Кулаковский И. В., Кирпичников Ф. С., Резник Е. И. Машины и оборудование для приготовления кормов : справочник часть 1. М. : Россельхозиздат, 1987. С. 285
15. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / Л.: Колос, Ленинградское отделение. – 1978. – 560 с.
16. ГОСТ 13586.3-84 «Зерно. Правила приемки и методы отбора проб».
17. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / Л.: Колос, Ленинградское отделение. – 1978. – 560 с.
18. Хабибуллин З.С. Анализ конструкций машин для дробления кормов / З.С. Хабибуллин, Р.Р. Лукманов, С.А. Синицкий, И.М. Гомаа // Научное сопровождение технологий агропромышленного комплекса: теория, практика, инновации. Труды I-ой Международной научно-практической конференции. 2020. С. 86-91.
19. Разработка автоматизированной дробилки концентрированных кормов / И. Т. Гильмуллин, Р. Р. Лукманов, С. А. Синицкий, З.С. Хабибуллин, Г.В. Алексеева, Тино Хохмут // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы : труды IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора

- Волкова И.Е., Казань, 04 июня 2021 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 24-30.
20. Хабибуллин, З. С. Анализ центробежных измельчителей фарша / З. С. Хабибуллин, Р. Р. Лукманов // Агроинженерная наука XXI века : Научные труды региональной научно-практической конференции , Казань, 18 января 2018 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2018. – С. 256-260.
 21. Мельников С.В. Моделирование рабочего процесса в молотковой кормодробилке // Механизация сельскохозяйственного производства: - Зап. Ленинградского СХИ.- Л., 1968. - т.119 -Вып.1.- С.113 - 117.
 22. 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.
 23. 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
 24. 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.
 25. Алешкин В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: Автор. дис. д-ра техн. наук. - Санкт-Петербург - Пушкин., 1995. - 38 с.
 26. 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.
27. Зиганшин Б.Г. Технологии и технические средства приготовления кормов / Б.Г. Зиганшин. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2003. – 188с.
 28. Семенов Е.В., Коробицын А.А., Карамзин В.А. Расчет производительности молотковой дробилки // Хранение и переработка сельхозсырья. - 1996. - № 1. - с.18.
 29. Способы измельчения зерна // Учебные материалы онлайн (info(at)studwood.ru) / 2017 – 2018. – [Электронный ресурс] / URL: http://studwood.ru/1827800/tovarivedenie/sposoby_izmelcheniya_zerna_muku/ (Дата обращения: 15.06.2018 г.).
 30. Семенов Е.В., Коробицын А.А., Карамзин В.А. Расчет производительности молотковой дробилки // Хранение и переработка сельхозсырья. - 1996. - № 1. - с.18.
 31. Файловый архив студентов // Алтайский государственный технологический университет / [Электронный ресурс] / StudFiles. - URL: <https://studfiles.net/preview/1825487/page:12/> (Дата обращения: 12.06.2018 г.).
 32. Семенов Е.В., Коробицын А.А., Карамзин В.А. Расчет производительности молотковой дробилки // Хранение и переработка сельхозсырья. - 1996. - № 1. - с.18.
 33. Все о технологии продуктов // Теория измельчения зерна. – 2015 / [Электронный ресурс] / URL: <http://hlebp-produkt.ru/mukomolnoeproizvodstvo/1545-teoriya-izmelcheniya-zerna.html/> (Дата обращения: 8.06.2018 г.).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица – Влияние диаметра отверстия решета и количества пакетов
молотков на модуль помола в процессе дробления

	№ пробы	G0, г (на дне)		G1, г (1 мм)		G2, г (2 мм)		G3, г (3 мм)		М Модуль помола
		Факт	Ср	Факт	Ср	Факт	Ср	Факт	Ср	
Ø2 мм При пакете 4 пшеница	1 проба	28,2		64,9		8,8				1,26
	2 проба	29,6	28,9	62,3	63,6	6,5	6,5	-	-	
	3 проба	28,9		63,6		4,2				
Ø2 мм При пакете 4 ячмень	1 проба	41,4		70,5		9,6				1,35
	2 проба	35,2	38,3	61,9	66,2	4,0	6,8	-	-	
	3 проба	38,3		66,2		6,8				
Ø2 мм При пакете 4 гор.ок	1 проба	48,2		47,3		7,6				1,07
	2 проба	47,6	47,6	47,8	47,8	4,6	4,6	-	-	
	3 проба	47,0		48,3		1,6				
Ø 2 мм При пакете 2 пшеница	1 проба	28,4		65,1		9,2				1,29
	2 проба	27,5	27,5	65,6	65,6	6,9	6,9	-	-	
	3 проба	26,6		66,1		4,6				
Ø 2 мм При пакете 2 ячмень	1 проба	32,6		64,6		9,9				1,37
	2 проба	32,8	32,6	65,2	64,6	10,2	9,9	-	-	
	3 проба	32,4		64		9,6				
Ø 2 мм При пакете 2 гор.ок	1 проба	48,3		46,3		9,7				1,09
	2 проба	46,1	46,1	50,1	48,2	1,7	5,7	-	-	
	3 проба	43,9		48,2		5,7				
Ø4 мм При пакете 4 пшеница	1 проба	10,3		53,1		19,9		8,1		1,86
	2 проба	7,7	9,0	59,5	56,3	27,7	23,8	13,7	10,9	
	3 проба	9,0		56,3		23,8		10,9		
Ø4 мм При пакете 4 ячмень	1 проба	16,4		46,4		24,3		24,54		1,95
	2 проба	14,8	15,6	38,8	42,6	23,4	23,4	12,34	18,44	
	3 проба	15,6		42,6		22,5		18,44		
Ø4 мм При пакете 4 гор.ок	1 проба	35,5		44,1		19,3		12,2		1,56
	2 проба	27,9	31,7	37,5	44,1	15,1	17,2	8,4	10,3	
	3 проба	31,7		40,8		17,2		10,3		
Ø6 мм При пакете 4 пшеница	1 проба	16,1		55,7		24,1		17,1		1,86
	2 проба	9,3	12,7	47,5	51,6	21,9	21,9	10,5	13,8	
	3 проба	12,7		51,6		19,7		13,8		
Ø6 мм При пакете 4 ячмень	1 проба	20,3		40,1		25,9		25,9		2,01
	2 проба	15,5	17,9	36,8	36,8	21,7	21,7	21,3	23,6	
	3 проба	17,9		33,5		17,5		23,6		
Ø6 мм При пакете 4 гор.ок	1 проба	11,9		39,9		28,3		34,9		2,27
	2 проба	5,3	8,6	32,9	36,4	20,5	24,4	30,6	30,6	
	3 проба	8,6		36,4		24,4		26,3		

Приложение Б

Таблица – Влияние диаметра отверстия решета на производительность в процессе дробления

	№ пробы	Время (с)	Масса (кг)		Производительность (кг/ч)
			Фактич.	Ср	
Ø2 мм При пакете 4 пшеница	1 проба	60	0,87	0,74	44,4
	2 проба		0,61		
	3 проба		0,74		
Ø2 мм При пакете 4 ячмень	1 проба	60	0,76	0,55	33
	2 проба		0,55		
	3 проба		0,34		
Ø2 мм При пакете 4 горох	1 проба	60	1,49	1,34	80,4
	2 проба		1,19		
	3 проба		1,34		
Ø4 мм При пакете 4 пшеница	1 проба	60	1,64	1,33	79,8
	2 проба		1,02		
	3 проба		1,33		
Ø4 мм При пакете 4 ячмень	1 проба	60	1,76	1,04	62,4
	2 проба		2,26		
	3 проба		1,26		
Ø4 мм При пакете 4 горох	1 проба	60	2,47	1,76	105,6
	2 проба		1,75		
	3 проба		2,11		
Ø6 мм При пакете 4 пшеница	1 проба	60	2,62	2,32	139,2
	2 проба		2,02		
	3 проба		2,32		
Ø6 мм При пакете 4 ячмень	1 проба	60	1,53	1,43	85,8
	2 проба		1,33		
	3 проба		1,43		
Ø6 мм При пакете 4 горох	1 проба	60	3,17	2,77	166,2
	2 проба		2,37		
	3 проба		2,77		

Приложение Б

Таблица – Влияние диаметра отверстия решета на удельный расход
электроэнергии в процессе дробления

	Производительность (кг/ч)	Удельный расход электроэнергии (Дж/кг)
Ø2 мм При пакете 4 пшеница	44,4	14,35
Ø2 мм При пакете 4 ячмень	33	33,11
Ø2 мм При пакете 4 горох	80,4	27,18
Ø4 мм При пакете 4 пшеница	79,8	7,98
Ø4 мм При пакете 4 ячмень	62,4	17,51
Ø4 мм При пакете 4 горох	105,6	20,69
Ø6 мм При пакете 4 пшеница	139,2	4,57
Ø6 мм При пакете 4 ячмень	85,8	12,73
Ø6 мм При пакете 4 горох	166,2	13,15