

на правах рукописи

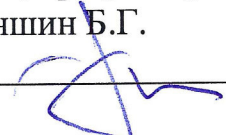
Хасанова Фарида Фаритовна

**РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕЗРЕШЕТНОЙ
МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ**

Научная квалификационная работа (диссертация)

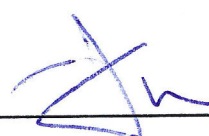
**На соискание квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» по
направлению подготовки 35.06.04 Технологии, средства механизации и
энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве**

Научный руководитель,
д. т. н., профессор
Зиганшин Б.Г.



Обсуждена на заседании кафедры и допущена к представлению научного доклада об
основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации)
на государственной итоговой аттестации
(протокол №__ от __2019 г.)

Заведующий кафедрой машин и
оборудования в агробизнесе



Зиганшин Б.Г.

Казань – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	8
1.1 Состояние вопроса и выбор направления исследований	8
1.2 Классификация машин для дробления зерна и их рабочих органов	16
1.3 Анализ применяемых в сельском хозяйстве машин для дробления зерна	19
1.3.1 Анализ решетных молотковых дробилок кормов.....	19
1.3.2 Анализ безрешетных молотковых дробилок.....	26
1.4 Анализ теоретических исследований рабочего процесса дробления зерна	30
1.5 Выводы по главе	34
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ, ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЕЗРЕШЕТНОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ	35
2.1 Основы теории молотковых дробилок и постановка задачи по ее ПРИЛОЖЕНИЮ К РАСЧЕТУ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ КОРМОВ.....	35
2.2 Основы теории энергетических затрат молотковой дробилки	39
2.3 Теоретический расчет пропускной способности дробилки кормов	44
2.4 Математическое моделирование рабочего процесса безрешетной молотковой дробилки.....	45
2.4.1 Математическое описание степени измельчения	45
в общем случае.....	45
2.4.2 Определение предельно достижимого уровня степени.....	48
измельчения	48
2.4.3 Математическое описание степени измельчения с учетом.....	50
зависимости интенсивности дробления от числа частиц	50
2.4.4 Изучение степени измельчения с учетом ее предельного значения	51
2.5 Расчёт конструкционно - технологических параметров дробилки кормов	54
2.6 Выводы по главе	63
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	64
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	64
3.2 Методика статистической обработки результатов эксперимента	71
3.3 Методика обработки экспериментальных данных.....	73
3.4 Выводы по главе	74
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	75
4.1 Определение пропускной способности безрешетной молотковой дробилки.....	75
4.2 Результаты определения модуля помола	80
4.3 Выводы по главе	82
ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	83
5.1 Расчет технико-экономических показателей новых технических средств приготовления кормов.....	83
5.2 Расчет энергетических показателей.....	86
ВЫВОДЫ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	97
ПРИЛОЖЕНИЯ	108

ВВЕДЕНИЕ

В животноводческой отрасли Российской Федерации, наряду с повышением породности животных и птицы, остается актуальной задача эффективного создания и использования кормовых ресурсов.

Для интенсивного развития животноводства очень важно последовательно улучшать качество кормов и особенно концентратов, чтобы они давали максимальный экономический и зоотехнический эффект [29]. Необходимым условием осуществления поставленных задач является разработка новых и совершенствование известных технологий и технических средств, позволяющих увеличить производительность труда и снизить себестоимость животноводческой продукции. Затраты на производство продукции животноводства определяются в первую очередь стоимостью кормов и их качеством [8].

Основные технологические и технические требования, которые предъявляются к машинам и оборудованию по приготовлению кормов на современном этапе, обусловлены необходимостью сократить потери питательных веществ в процессе заготовки, переработки, хранения, приготовления и раздачи кормов [6].

Приготовление кормов - один из важнейших технологических процессов в животноводстве. Наиболее трудоемкой в кормопроизводстве является дробление компонентов кормовой смеси. Эффективное дробление кормов важнейшее условие правильного кормления животных [52,97]. Кормовая смесь, соответствующая зоотехническим требованиям и имеющая определенный гранулометрический состав, обладает лучшей усвояемостью и позволяет рационально использовать кормовое сырье.

Проблема эффективного дробления зерна все еще остается насущной, здесь речь идет о качестве зерна, об эффективности его использования в кормовых целях, что определяется зоотехническими требованиями. Пока еще на производстве высокий расход кормов и низкая продуктивность скота и птицы [18].

Основным оборудованием для дробления зерна в комбикормовой промышленности и в хозяйствах являются молотковые дробилки. Благодаря простоте конструкции, надежности в работе они нашли широкое применение.

Несмотря на их широкое распространение, они имеют ряд существенных недостатков, основным из которых является высокий расход энергии и неравномерность гранулометрического состава готового продукта [53,99,118].

В безрешетных дробилках непроизводительные расходы снижаются, но при этом ухудшается гранулометрический состав готового продукта, что обуславливает необходимость выведения сепарирующих устройств за пределы рабочей камеры и повторного дробления крупных частиц.

Главным направлением снижения энергоемкости процесса дробления зерна является разработка новых способов и высокоэффективных технологий, а также машин, обеспечивающих существенное снижение затрат на этот процесс [4,95].

Для улучшения равномерности готового продукта необходимо совершенствовать организацию процесса дробления в рабочей камере дробилки и образование гранулометрического состава готового продукта, превратив его из вероятностного в управляемый.

Энергоемкость процесса дробления и качество конечного продукта - две основные части одной проблемы: получения продукта, соответствующего зоотехническим требованиям, с минимально возможными энергетическими затратами. Проблема эта комплексная и актуальность ее постоянна. Успешное решение ее должно базироваться на взаимодействии достижений научно - технического прогресса с глубиной понимания процессов и их закономерностей. Результатом может явиться новая конструктивная разработка, позволяющая реализовать новую технологическую схему разрушения зерна и других сыпучих материалов [17].

Анализ существующих конструкций молотковых дробилок и организации процесса дробления в них показали, что в работе по снижению энергоемкости процесса дробления и улучшению качества получаемого продукта в производстве полнорационных кормов имеет место тенденция разработки и применения измельчителей, работающих по принципу ударного разрушения материала о неподвижную преграду [94,98,113]. Такой принцип дробления позволяет снизить энергозатраты и осуществить центральный удар в полной мере в безрешетных дробилках, что способствует гарантированному разрушению частицы одним ударом.

Цель исследования. Повышение качества измельченного материала на основе разработки конструкционно-технологических параметров безрешетной молотковой дробилки.

Объект исследования. Технологический процесс измельчения зерна в безрешетной молотковой дробилке.

Предмет исследования. Закономерности влияния конструкционно-технологических параметров на качество измельченного продукта.

Методология и методы исследований. В теоретических исследованиях использованы положения и методы классической механики и математического аппарата. Экспериментальные исследования выполнены на специально изготовленном лабораторном оборудовании. Моделирование технических процессов выполнены с помощью программ КОМПАС-3D-V13 и SolidWorks2012. Полученные данные обрабатывались методами математической статистики с использованием пакетов MathCAD 15.0, Statistika 6.1.

Научная новизна:

1. Разработана модель технологического процесса работы дробилки с учётом его геометрических характеристик.
2. Обоснованы параметры и режимы работы безрешетной молотковой дробилки для измельчения зерна.
3. Определена зависимость гранулометрического состава измельченного материала от конструктивных и кинематических параметров рабочих органов и энергоёмкость процесса измельчения.

Новизна технических решений подтверждена патентом на полезную модель № 162595 в Федеральном институте промышленной собственности.

Теоретическая значимость работы. Разработанные математические модели позволяют определить зависимости пропускной способности Q от скорости вращения молотков V , удельного расхода энергии N_e от скорости вращения молотков V , модуля помола M от скорости вращения молотков V , степень измельчения λ (ржи, пшеницы, гороха) от времени нахождения t продукта в рабочей камере.

Практическая значимость. По результатам исследований обоснованы конструкционно-технологические параметры, создан опытный образец безрешетной молотковой дробилки, обеспечивающий более качественное выполнение технологического процесса по сравнению с аналогами.

Разработанная дробилка позволяет уменьшить энергозатраты на 7-9%.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований подтверждается адекватностью полученных математических моделей. При экспериментах применялось современное сертифицированное оборудование и приборы, прошедшие проверку.

Основные научные положения доложены и обсуждены на всероссийских и международных научных конференциях «Наука молодых – инновационному развитию АПК», «Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники», «Аграрная наука в инновационном развитии АПК», «Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК» (Башкирский ГАУ, 2013-2018 г.), «Инженерная наука – аграрному производству» (Казанский ГАУ, 2013-2019 г.).

Вклад автора в проведенные исследования. Автор принимал участие на всех стадиях проведения исследований: выполнено теоретическое исследование процесса измельчения зерна, разработана математическая модель и произведена ее численная реализация, разработан экспериментальный образец безрешетной молотковой дробилки, выполнено теоретическое обоснование его конструктивных и технологических параметров, проведены исследования опытного образца в лабораторных и производственных условиях.

Задачи исследований.

1. На основе проведенной классификации и конструкций машин для дробления зерна разработать схему и конструкцию дробилки зерна молоткового типа.
2. Провести необходимые технологические и конструктивные расчеты разработанной дробилки молоткового типа.
3. Провести исследования процесса дробления зерна на разработанной дробилке молоткового типа в лабораторных условиях.

4. Провести технико-экономическую и энергетическую оценки исследований.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическое обоснование технологического процесса безрешетной молотковой дробилки.
2. Конструкционно-технологическое обоснование параметров безрешетной молотковой дробилки.
3. Экспериментальное обоснование конструкционно-технологических параметров безрешетной молотковой дробилки.
4. Технико-экономическая и энергетическая оценка эффективности работы разработанной безрешетной молотковой дробилки

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, получены патенты на изобретения №2596756, №2667098, на полезную модель №155692, №162595, №181466.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, Выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 7 таблиц и приложений на 5 страницах. Список литературы включает 132 наименований.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Состояние вопроса и выбор направления исследований

Техническое обеспечение сельскохозяйственного производства на современном этапе должно быть направлено на полное удовлетворение потребности общества в продуктах питания на основе использования ресурсо- и энергосберегающих технологий во всех отраслях сельского хозяйства. Одной из главных задач инженерно-технических исследований является разработка энергосберегающих технологий и технических средств при производстве и переработке сельскохозяйственной продукции. При этом необходимо обеспечивать безопасность для окружающей среды и здоровья населения, а также получение экологически чистых продуктов.

Обеспечение качественными и в достаточном количестве продуктами животноводства на сегодня является одной из стратегических задач создания продовольственной безопасности страны в целом. Решение ее возможно только при наличии мощной кормовой базы. В сельскохозяйственных предприятиях Республики Татарстан, в среднем за последние годы (2010...2018 гг.) ежегодно заготавливалось на корм скоту более 1696,2 тыс.т силоса, 2724,3 тыс.т сенажа, 807,9 тыс.т сена и т.д. Всего, например, в 2018 году было заготовлено 32,7 центнеров кормовых единиц на одну условную голову. В структуре расхода кормов концентрированные корма занимают 35,7%, сочные – 15,6%, грубые – 18,7%. Анализ динамики заготовки кормов по республике показывает, что, несмотря на фактическое снижение объема заготовки видов кормов по годам, имеется стабильная тенденция увеличения содержания кормовых единиц в единице корма в расчете на одну условную голову скота [37]. Это является результатом использования передовых технологий и опыта заготовки кормов (сенажа «в упаковке», применение комбисилоса и суперсилоса, приготовление комбикормов с использованием собственных зерновых ресурсов и покупных БМВД, возделывание новых видов кормовых культур и т.д.), а также особого внимания к условиям хранения кормов и особенно подготовки их к скармливанию.

В настоящее время в сельскохозяйственных предприятиях Республики Татарстан основная масса кормов поступает от полевого кормопроизводства.

Почти 40% посевных площадей приходится на кормовые культуры [46]. Если учесть, что часть зерна продовольственных культур (рожь, пшеница, горох), а также отходы от производства других посевных культур потребляются на кормовые цели, то можно считать, что сегодня значительная часть посевных площадей приходится на кормовые культуры.

Важно отметить, что доля кормов в структуре затрат как на основное производство сельскохозяйственной продукции, так и в структуре затрат отдельного вида, например, молока очень велика. В первом случае от общей доли материальных затрат в размере 73%, корма занимают 22% и соизмеримы только с затратами на заработную плату – 18 %. Даже затраты на ГСМ и запасные части намного меньше затрат на корма. Из структуры затрат на производство молока видно, что доля затрат на корма превышает 50% от всех затрат (рисунок 1.1). Из анализа имеющихся данных (данные РИВЦ МСХ и П РТ) становится очевидным, что даже небольшая экономия материальных затрат, связанных с кормами, существенно повысит экономическую эффективность не только животноводческой отрасли, но и в целом сельскохозяйственного производства.

На эффективность производства животноводческой продукции влияет и качество приготавливаемых кормов. Одним из факторов, влияющих на качество, является степень измельчения кормов.

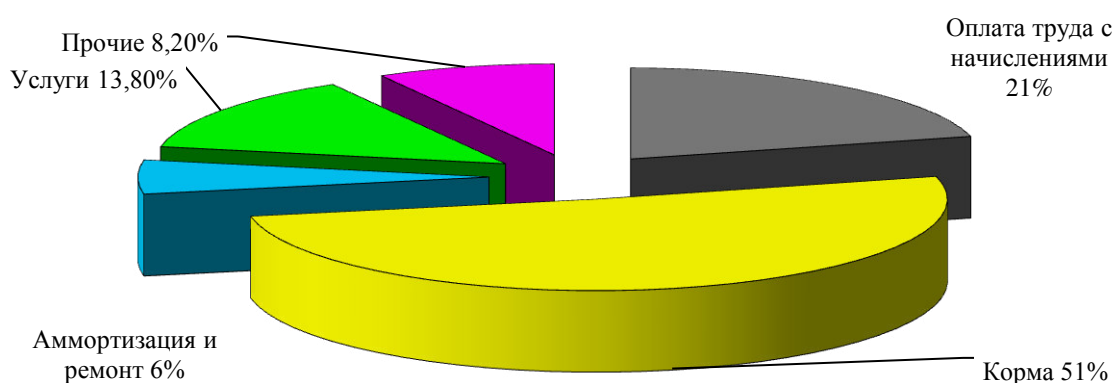


Рисунок 1.1 – Структура затрат на производство молока(на 1 января 2019 г.)

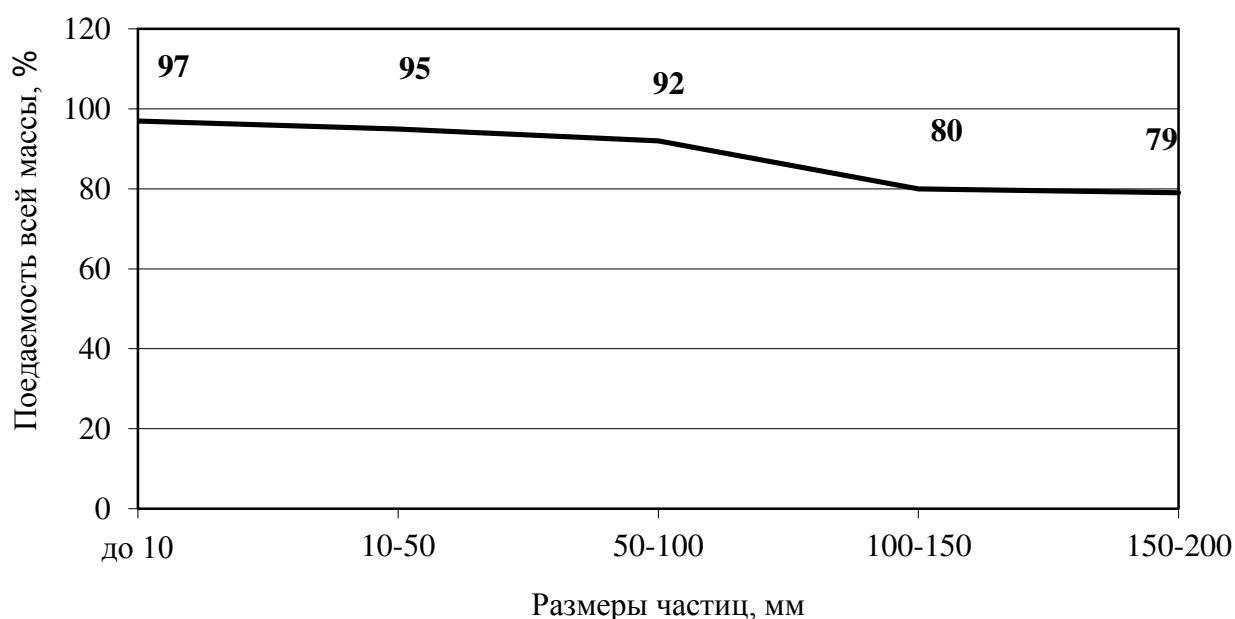


Рисунок 1.2 – Поедаемость кукурузного силоса в зависимости от степени его измельчения

Кроме того, степень измельчения влияет на поедаемость кормов, то есть на эффективность их использования [16]. Как видно из рисунка 1.2, с уменьшением размеров частиц кукурузного силоса от 200 до 10 мм увеличивается поедаемость всей массы на 18%. Другим, не менее важным фактором, влияющим на качество кормов, является время заготовки кормов. Так в зависимости от фазы созревания кукурузы коэффициент перевода сухого вещества в кормовые единицы увеличивается с 0,87 до 1,0 (рисунок 1.3). Иными словами, заготавливая кукурузу на корма в фазе восковой спелости, можно увеличить питательность кормов на 13%.

Динамика изменения цен на энергоресурсы, технику и сельскохозяйственную продукцию наглядно демонстрирует нам, насколько разнятся отпускные цены на дизтопливо, комбайны и т.д. с одной стороны и на сельскохозяйственную продукцию с другой (рисунок 1.4). В условиях существующего диспаритета цен особую роль в повышении эффективности

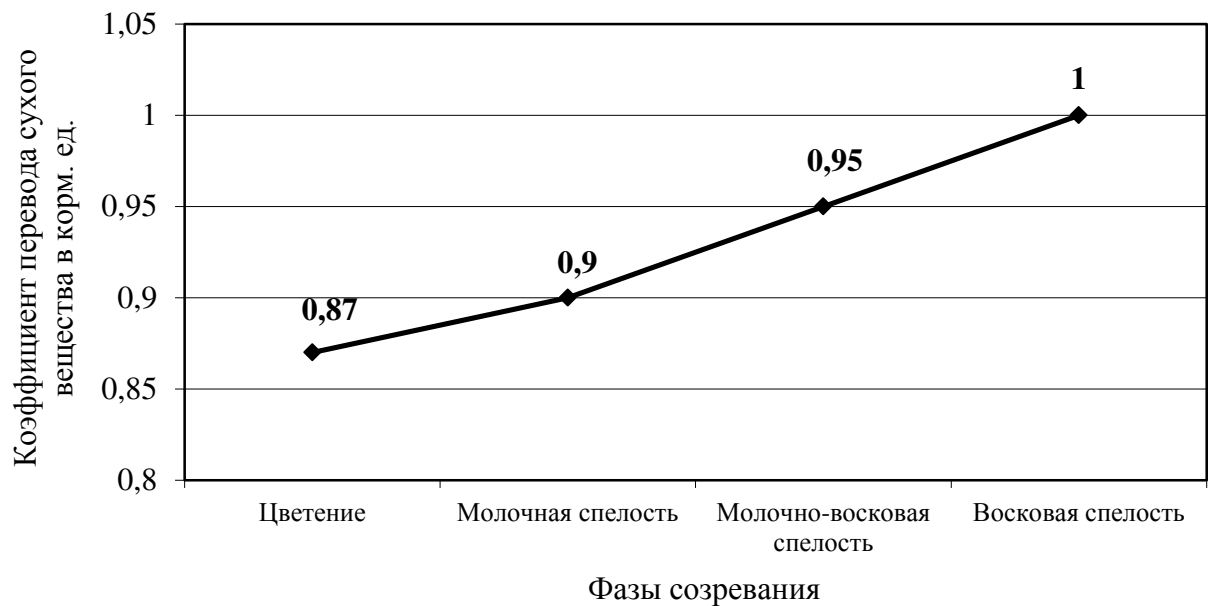


Рисунок 1.3 – Качество кукурузного силоса в зависимости от фазы созревания

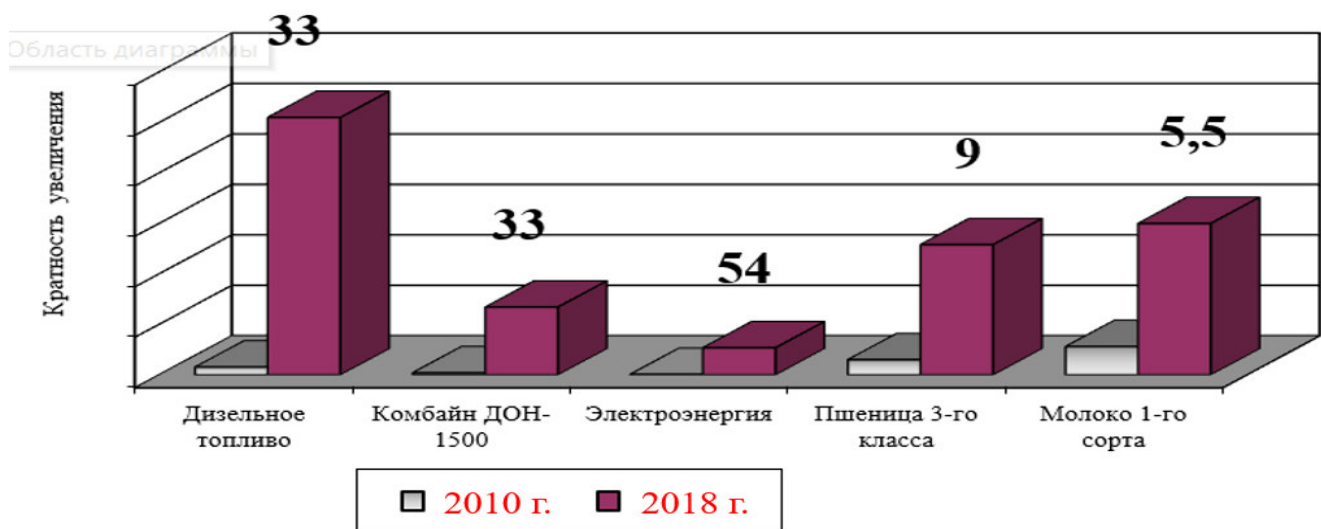


Рисунок 1.4 – Динамика изменения цен на энергоресурсы, технику

и сельхозпродуктысельскохозяйственного производства имеет производство продукции на основе энергосберегающих технологий и технических средств, с применением передовых отечественных и зарубежных конструкций и комплексов машин.

Одним из основных и энергоемких способов измельчения является дробление. На практике для его осуществления применяют различные по

конструкции и протеканию технологического процесса дробилки. В сельскохозяйственном производстве для измельчения кормов в течение многих десятилетий используют молотковые дробилки, они получили широкое распространение вследствие простоты конструкции, технологичности, высокой производительности, компактности, универсальности и ряда других факторов. Свое название, как и термин “дробление”, они получили “из практики горнорудной промышленности” [20,33].

В горнорудной и цементной отраслях промышленности дробление является одним из подготовительных процессов, так как получаемый после дробления материал подлежит дальнейшей переработке. В сельскохозяйственном производстве после дробления получают конечный продукт, то есть процесс дробления имеет самостоятельное значение.

Процесс дробления используют во многих отраслях народного хозяйства, и каждая накладывает свою специфику как на сам процесс дробления, так и на конструкции дробилок [14,41,54,102,117]. В ряде случаев исходный материал представляет собой массу, содержащую разные по прочности компоненты, и из этой массы требуется выделить наиболее прочные составляющие. Это достигается путем использования так называемого «избирательного дробления». При этом более интенсивно разрушаются менее прочные составляющие.

К дробилкам, используемым для переработки бытовых отходов, предъявляются требования по довольно большой производительности, способности перерабатывать материал различной прочности и характеристик. Определенные требования предъявляются и к дробилкам, применяемым при дроблении металлической стружки, лома и т.д.

В зависимости от назначения и принципа действия в дробилках используются такие виды нагрузок [129,132], как плющение, раскалывание, излом, истирание. Обычно различные виды нагрузок действуют одновременно. Необходимость в использовании различных видов нагрузок, а также конструкций определяется многообразием свойств материалов, а также требованиями, предъявляемыми к размерам получаемого продукта. Профессор Л.Б.Левинсон в 1933 г. писал: “Можно, пожалуй, сказать, что ни один класс машин не обладает таким богатством конструктивных форм, как дробильные машины”. Это

высказывание справедливо по отношению к сельскохозяйственным дробилкам и вполне актуально сегодня.

Большое разнообразие дробилок можно разделить на следующие основные виды: щековые, конусные, валковые, ударного действия. Последние, в свою очередь, подразделяются на молотковые и роторные [78]. В молотковых дробилках молотки подвешены шарнирно, а в роторных молотки-билы жестко прикреплены к ротору.

Щековые дробилки используются для крупного и среднего дробления материалов в горнорудной промышленности и промышленности строительных материалов. Принцип таких дробилок заключается в том, что камера дробления имеет форму клина, образованную двумя щеками, одна из которых является в основном неподвижной, а вторая – подвижной. При периодическом движении подвижной щеки происходит дробление материала и одновременно удаление измельченного материала из рабочей камеры [71,84,103].

При дроблении широко используются и конусные дробилки [120]. В таких машинах дробление происходит за счет сжатия исходного материала между конусами, расположенными один внутри другого. Рабочая камера современных конусных дробилок образуется сложными, часто криволинейными поверхностями. Первые машины имели рабочие камеры, образованные двумя усеченными конусами, это и послужило основанием для названия таких дробилок конусными [44,68].

Валковые дробилки отличаются тем, что их рабочим органом является валок, вращающийся на горизонтальной оси. Измельчаемый материал в этом случае подается сверху, затягивается между валками и тем самым дробится.

Роторные дробилки [109,130] применяются в различных областях промышленности. Это машины ударного действия. Дробление в них происходит за счет быстро вращающихся бил, которые жестко прикреплены на роторе. Ротор установлен внутри корпуса. На стенках корпуса установлены приемный лоток, отражательные плиты, колосниковые решетки, которые образуют с ротором камеру дробления.

Молотковые дробилки [108] представляют собой машины ударного действия с молотками, шарнирно закрепленными на роторе. Молотковым

дробилкам присущи высокая степень измельчения, относительно невысокая стоимость измельчения материала. Конструктивные параметры и потребная мощность на единицу производительности в 2...5 раз меньше, чем у щековых и конусных дробилок. Возможность присоединения загрузочных и разгрузочных каналов к трубопроводам, герметичность корпуса сводят до минимума выброс пыли в окружающую среду [121,131]. Молотковые дробилки имеют простую конструкцию, удобны в обслуживании. Наличие динамически сбалансированного ротора не требует сооружения тяжелого фундамента.

Первые молотковые дробилки были изобретены еще в XIX в. В 1860 г. в Лондоне был зарегистрирован патент “на машину ударного действия для дробления кварца и тому подобных материалов” [27]. В настоящее время молотковые дробилки нашли широкое применение во многих отраслях промышленности и в сельском хозяйстве. Их используют в цементной промышленности при измельчении основных компонентов цемента. В асбестовой промышленности они эффективно используются для дробления асбестовой руды. Молотковые дробилки применяют при производстве стекла, наполнителя в пластмассы, доломитовой муки, строительного кирпича, угля и большого ряда других материалов и продуктов [125]. В сельскохозяйственном производстве молотковые дробилки получили широкое распространение при измельчении зерна в комбикормовой промышленности, при дроблении фуражного зерна непосредственно в кормоцехах хозяйства благодаря надежности работы, удобству в обслуживании, простоте конструкции. Такие дробилки обеспечивают довольно равномерное измельчение исходного материала, быстрое удаление измельченного продукта из рабочей камеры, возможность регулирования степени измельчения и уменьшения образования пылевидной фракции, минимальный удельный расход энергии на дробление, возможность механизировать загрузку и разгрузку материала, автоматизировать управление технологическим процессом [19,127].

Основополагающими работами по исследованию рабочих процессов измельчителей кормов являются труды В.П.Горячкина, В.А.Желиговского, М.М.Гернета, С.В.Мельникова, С.Д.Хусида, получившие дальнейшее развитие в исследованиях В.Р.Алешкина, В.Г.Артемьева, В.Г.Артемьева, А.А. Артюшина, Б.И. Вагина, В.А.Голикова, В.А.Денисова, П.В.Зайцева, В.А.Елисеева,

Г.М.Кукты, В.Ф.Некрашевича, И.И.Ревенко, Н.Е.Резника, В.И.Сыроватки и многих других ученых.

Большой вклад в развитие исследований теории дробления и создания молотковых дробилок внесли Н.Ф.Баранов, И.Е.ВолковБ.Г. Зиганшин, П.М.Рощин, Х.А.Рах-матуллин, В.А.Денисов, В.Г.Мохнаткин, Ф.Г.Плохов, В.А.Сысуев и многие другие.

Исследования энергоемкости процесса дробления проводили Ф. Бонд, В.Л.Кирпичев, Ф.Кик, П.Ребиндер, П.Риттингер, Р.А.Родин, А.К.Рундквист, С.В.Мельников и другие.

Изучением воздушного режима в рабочей камере дробилки занимались М.Е. Гиршин, Н.Ф. Игнатьевский, А.М. Карнов, Ф.С.Кирпичников, Н.П.Сычугов и другие.

Дробилки классифицируют по различным признакам: по принципу работы, по конструктивным и аэродинамическим особенностям, по способу технологического процесса и др. По конструктивным признакам молотковые дробилки подразделяются на одно- и двухроторные, с горизонтальным и вертикальным расположением вала ротора, реверсивные и нереверсивные, решетные и безрешетные и т. д. Основной и наиболее многочисленный тип молотковых дробилок – однороторный, как наиболее простой по конструкции и универсальный по применению [92,111].

Кроме вышеперечисленных дробилок в настоящее время известны дробилки для измельчения липких материалов, а также специальные дробильные машины для измельчения таких материалов, где невозможно использовать дробилки общего назначения [28,55]. К таким машинам можно отнести дробилки для измельчения металлической стружки, отходов электромеханической промышленности, особопрочных материалов, металлолома, металлургических шлаков, бытовых отходов.

Таким образом, технологические схемы измельчения кормов, с учетом современных требований, должны развиваться в направлении снижения энергозатрат, улучшения качества получаемого продукта, расширения технологических возможностей, полной механизации и автоматизации загрузки и выгрузки измельчителей кормов.

1.2 Классификация машин для дробления зерна и их рабочих органов

В дробилках используются такие виды нагрузок как раздавливание, раскалывание, излом, истирание. Как правило различные виды нагрузок действуют одновременно. Необходимость в использовании различных видов нагрузок, а также конструкций определяется многообразием свойств материалов, а также требованиями к размерам получаемого продукта. Профессор Л.Б.Левенсон в 1933 г. писал: “Можно, пожалуй, сказать, что ни один класс машин не обладает таким богатством конструктивных форм, как дробильные машины”. Это высказывание справедливо и по отношению к сельскохозяйственным дробилкам и вполне актуально на сегодняшний день [90,106,122].

Дробилки подразделяют на следующие основные виды: щековые, конусные, валковые, ударного действия. Дробилки ударного действия подразделяются на молотковые и роторные [124,126]. В молотковых дробилках молотки подвешены шарнирно, а в роторных - жестко прикреплены к ротору.

Щековые дробилки используются для крупного и среднего дробления материалов в горнорудной промышленности и промышленности строительных материалов. Принцип таких дробилок заключается, в том, что камера дробления имеет форму клина, образованную двумя щеками. Одна из которых, в основном, является неподвижной, а вторая - подвижной. При периодическом движении подвижной щеки происходит дробление материала и одновременно удаление измельченного материала из рабочей камеры [15,24].

В производстве широко используются и конусные дробилки. В таких машинах дробление происходит за счет сжатия исходного материала между конусами, расположенными один внутри другого. В современных конусных дробилках рабочая камера образуется сложными поверхностями. Так как первые машины имели рабочие камеры, образованные двумя усеченными конусами, то это и послужило основанием для названия таких дробилок конусными.

Валковые дробилки отличаются тем, что рабочим органом их является валок, вращающийся на горизонтальной оси. Измельчаемый материал в этом случае подается сверху, затягивается между валками и тем самым дробится.

Роторные дробилки применяются в различных областях промышленности. Эти машины ударного действия. Дробление в них происходит за счет быстро вращающихся бил, которые жестко прикреплены на роторе. Ротор установлен внутри корпуса. На стенках корпуса установлены приемный лоток, отражательные плиты, колосниковые решетки, которые образуют вместе с ротором камеру дробления [25].

Молотковые дробилки представляют собой машины ударного действия, с молотками, шарнирно закрепленными на роторе. Молотковым дробилкам присуще высокая степень измельчения, относительно невысокая стоимость измельченного материала. Конструктивные параметры и потребная мощность на единицу производительности в 2-5 раз меньше, чем у щековых и конусных дробилок. Возможность присоединения загрузочных и разгрузочных каналов к трубопроводам, герметичность корпуса сводят до минимума выброс пыли в окружающую среду. Молотковые дробилки имеют простую конструкцию, удобны в обслуживании. Наличие динамически сбалансированного ротора не требует сооружения тяжелого фундамента [23].

Молотковые дробилки были изобретены еще в XIX веке. В 1860г. в Лондоне был зарегистрирован патент “на машину ударного действия для дробления кварца и тому подобных материалов”. Современные молотковые дробилки нашли широкое применение во многих отраслях промышленности и сельском хозяйстве. Их применяют в цементной промышленности при измельчении основных компонентов цемента. В асбестовой промышленности они эффективно используются для дробления асбестовой руды. Молотковые дробилки применяют при производстве стекла, наполнителя в пластмассы, доломитовой муки, строительного кирпича, угля и большого ряда других материалов и продуктов [13].

В сельскохозяйственном производстве молотковые дробилки получили широкое распространение при измельчении зерна в комбикормовой промышленности, дроблении фуражного зерна непосредственно в хозяйствах благодаря надежности работы, удобству обслуживания, простоте конструкции. Молотковые дробилки обеспечивают довольно равномерное измельчение исходного материала, быстрое удаление измельченного продукта из рабочей

камеры, возможность регулирования степени измельчения, уменьшения образования пылевидной фракции, минимальный удельный расход энергии на дробление, возможность механизировать загрузку и разгрузку материала, автоматизировать управление технологическим процессом [21].

Современные дробилки классифицируют по различным признакам: по принципу работы, по конструктивным и аэродинамическим особенностям, по способу технологического процесса и др. По конструктивным признакам молотковые дробилки различают одно- и двухроторные, с горизонтальным и вертикальным расположением вала ротора, реверсивные и нереверсивные, решетные и безрешетные и т. д. Основной и наиболее многочисленный тип молотковых дробилок - однороторный, как наиболее простой по конструкции и универсальный по применению [30].

Кроме вышеперечисленных дробилок в настоящее время известны дробилки для измельчения липких материалов, а также специальные дробильные машины для измельчения таких материалов, где невозможно использовать дробилки общего назначения. К таким машинам можно отнести дробилки для измельчения: металлической стружки, отходов электромеханической промышленности, особопрочных материалов, металлолома, металлургических шлаков, бытовых отходов [11].

Таким образом, технологические схемы измельчения кормов, с учетом современных требований, должны развиваться в направлении снижения энергозатрат, улучшения качества получаемого продукта, расширения технологических возможностей, полной механизации и автоматизации загрузки и выгрузки измельчителей кормов.

1.3 Анализ применяемых в сельском хозяйстве машин для дробления зерна

1.3.1 Анализ решетных молотковых дробилок кормов

В сельскохозяйственном производстве молотковые дробилки предназначены, главным образом, для дробления зерна различных культур. Однако в некоторых конструкциях они успешно применяются для дробления жмыха, кукурузных початков и других кормов. В настоящее время известно значительное количество молотковых дробилок, которые имеют различные конструктивные особенности [10, 31].

Известна молотковая дробилка [65] (рисунок 1.5), предназначенная для

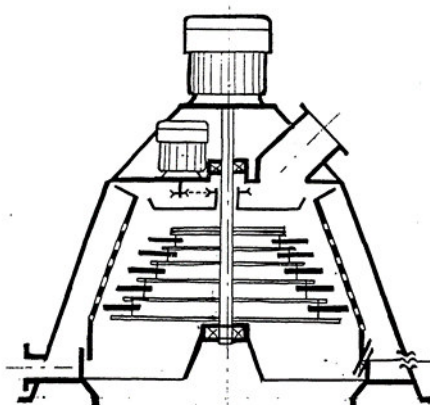


Рисунок 1.5 Конструктивно-технологическая схема решетной молотковой дробилки Патент № 410810

измельчения материалов, отличительной особенностью которой является наличие распределительной тарелки на роторе дробилки, позволяющей повысить эффективность дробления и уменьшить содержание пыли в измельченном продукте; конического и вертикального ротора с молотками, имеющими переменные уменьшающиеся массы в направлении к нижней части ротора [21]. Образованные в конструкции дробилки две изолированные зоны для отбора готовой продукции позволяют получить из первой зоны продукт постоянной мелкой фракции, а из второй - продукт разнообразной фракции. Работа дробилки заключается в следующем. Исходный продукт подается на распределительную тарелку, которая вращается по ходу вращения ротора и имеет отдельный привод. При измельчении ударным действием молотков до определенного значения продукт проходит через сита в первую зону и удаляется пневмотранспортом.

Продукт переменной фракции попадает в зону действия молотков переменных масс. Число ударов возрастает по мере продвижения продукта вниз, вследствие увеличения количества молотков в ярусе, а также увеличении их окружной скорости. Преимуществом данной дробилки является обеспечение измельчения материала с минимальным содержанием пылевидной фракции. Для изменения состава второй фракции и регулировки зазора между молотками с ситом, вследствие износа, имеется устройство, позволяющее легко это сделать без переналадки и остановки машины. При износе рабочих углов молотков с одной стороны необходимо лишь изменить направление вращения распределительной тарелки и ротора в обратную сторону, что существенно снижает трудоемкость при эксплуатации дробилки.

Одним из недостатков данной машины является наличие сита (решета), которое не позволяет измельчить материалы повышенной влажности, и трудоемкость замены сита при необходимости получения различных мелких фракций. Для различных материалов при различных условиях необходимо для каждого случая определять массу и форму молотков и их окружную скорость. Кроме того вышеперечисленные недостатки и преимущества в значительной мере удорожают и усложняют конструкцию машины.

Молотковая дробилка [7], предназначенная для использования в мукомольной и комбикормовой промышленности, представлена на рисунке 1.6. Работа дробилки происходит следующим образом. Исходный продукт подается через загрузочное окно в дробильную камеру. Измельченный под действием молотков продукт проходит через отверстия сита и удаляется из рабочей камеры.

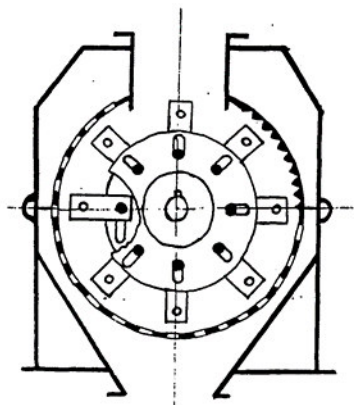


Рисунок 1.6 Конструктивно-технологическая схема решетной молотковой дробилки. Авторское свидетельство 321283

Для обеспечения возможности регулирования рабочего зазора между молотками и поверхностью рабочей камеры, и, тем самым повышения эффективности дробления, предусмотрено специальное устройство. Для этого ротор дробилки снабжен регулировочными кольцами, установленными с торцов. При этом кольца имеют возможность перемещаться относительно ротора вокруг оси. В дисках ротора и регулировочных кольцах выполнены пазы, в которых установлены оси с молотками. При этом пазы регулировочных колец и дисков ротора направлены под углом друг к другу. Для регулирования рабочего зазора ослабляют болты крепления регулировочных колец и одновременно поворачивают их относительно крайних дисков ротора дробилки вокруг оси вращения. При этом оси с молотками перемещаются в пазах дисков и тем самым изменяют рабочий зазор. После установки зазора регулировочные кольца затягиваются болтом на крайних дисках ротора. Недостатком данной дробилки является наличие решета (сита) в рабочей камере для регулирования модуля помола. Кроме того, изменение рабочего зазора в дробильной камере не столь существенно влияет на размер конечного продукта, как в случае применения для этих целей решет. Поэтому экономически нецелесообразно в данной конструкции применять такое устройство.

Для измельчения зерновых культур, используемых в кормовых целях, используется дробилка, представленная на рисунке 1.7 [3]. Как известно, при

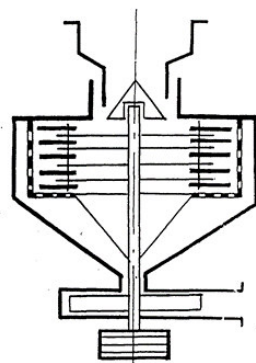


Рисунок 1.7 Конструктивно-технологическая схема решетной молотковой дробилки. Авторское свидетельство 152608

измельчении концентрированных кормов образуется пылевидная фракция, которая отрицательно влияет на организм животных при вдыхании их в процессе поедания корма. Данная молотковая дробилка для устранения этих недостатков, снабжена дополнительными решетками, которые установлены непосредственно в

дробильной камере. Исходный продукт, зерно, поступает по конусу кольцевым слоем в дробильную камеру. Под ударным действием молотков зерно измельчается и частицы, не прошедшие через отверстия решета, опускаются вниз и дополнительно измельчаются на более мелкие частицы и просеиваются через горизонтальные решета. Лопастной вентилятор постоянно отсасывает мелкие частицы измельченного зерна из дробильной камеры через решета. Производительность дробилки регулируется поднятием или опусканием конуса. Недостатками данной машины, как и выше перечисленных, является наличие решета, которое не позволяет дробить зерно повышенной влажности. В данной конструкции замена решет также является трудоемким процессом.

Известна дробилка молотковая [12], отличительной чертой которой является наличие жестких тяг, с помощью которых шарнирно соединены между собой молотки (рисунок 1.8). При этом в процессе работы дробилки молотки наносят по измельчаемому материалу значительное количество ударов. Как известно, сила удара молотка зависит от его скорости и массы. Так как скорость молотков постоянная, то силу удара повышают, увеличивая массу молотков за счет шарнирного соединения жесткой тягой. Недостатком данной конструкции является то, что молотки теряют способность отклоняться вокруг своей оси, поэтому при попадании посторонних предметов в рабочую камеру возникает аварийная ситуация.

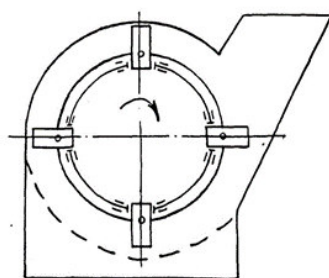


Рисунок 1.8 Схема дробилки. Авторское свидетельство 948429

Дробилка приведенная [5] на рисунок 1.9 имеет молотки с гранями криволинейной формы с зубцами на концевой части [2]. Кроме того решето, имеет отверстия как в выступях, так и между ними, значительно повышающие сепарирующую способность. Существенными недостатками необходимо признать недолговечность работы молотков и решет, вследствие быстрого износа, трудоемкость в их изготовлении, а также удорожание конструкции.

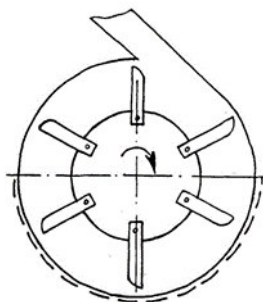


Рисунок 1.9 Схема дробилки. Авторское свидетельство 173521

Дробилка кормов [9] (рисунок 1.10) содержит дробильную камеру внутри которой расположен ротор с молотками разной длины и массы, конусную ситовую обечайку с лопастями, которые способствуют удалению измельченного продукта из рабочей камеры. Ситовая обечайка вращается в обратную сторону вращению ротора, что в свою очередь должно привести к разрушению воздушно-продуктового слоя и тем самым улучшить условия своевременного вывода измельченного материала из зоны дробления. Однако данная машина сложна по конструкции, трудоемка в обслуживании, в изготовлении и, как следствие, дорогая. Наличие решет не позволяет использовать ее при дроблении влажных материалов.

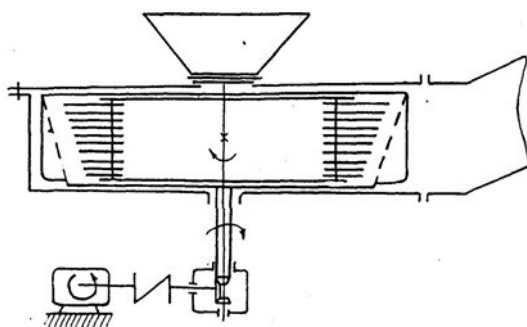


Рисунок 1.10 Схема дробилки. Авторское свидетельство 622454

На рисунке 1.11 представлена молотковая дробилка [1], содержащая корпус с питателем, молотковый ротор, станину, которая для повышения долговечности дробилки конструктивно выполнена из двух частей, установленных одна над другой. При этом ротор дробилки установлен на одной части, а корпусна другой.

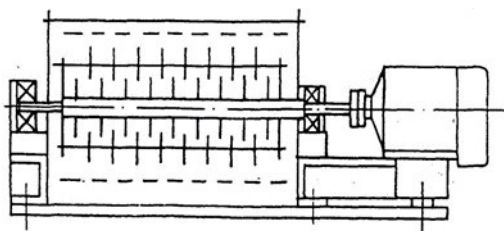


Рисунок 1.11 Схема дробилки. Авторское свидетельство 1071308

Данное техническое решение позволяет снизить влияние вибрационных нагрузок, выполнить конструкцию дробилки облегченной и, тем самым, снизить металлоемкость. Но наличие решета, а так же относительная сложность самой конструкции являются довольно серьезными недостатками рассматриваемой дробилки.

Известны дробилки [2], которые содержат несколько ступеней измельчения, расположенных последовательно, относительно вертикальной оси, в одном цилиндрическом корпусе. Подвижные рабочие органы в виде разгонных дисков (рисунок 1.12) центробежного типа закреплены на вертикальном валу. Каждая ступень измельчения кроме рабочего органа содержит также отбойную деку, скатную доску и решетный классификатор. Предлагаемый многостадийный способ измельчения разгонными дисками позволяет снизить износ рабочих органов и энергоемкость процесса, увеличить однородность помола. Однако наличие решетного классификатора, довольно значительной установленной мощности и сложность конструкции не позволяют широко применять данные дробилки в хозяйствах.

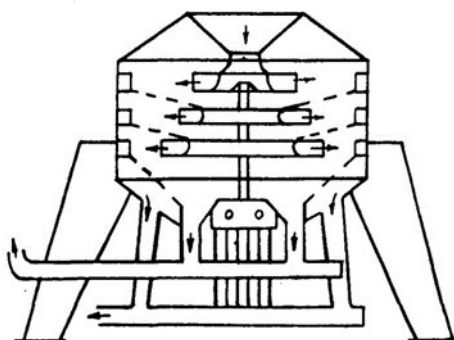


Рисунок 1.12 Схема центробежной многоступенчатой дробилки

Дробилки, представленные [56,57] на рисунках 1.13 и 1.14, в похожи по конструкции и способу работы между собой. Одна из них имеет возможность реверсирования, что несомненно облегчает обслуживание и увеличивает срок

работы дробилки до замены молотков. Но наличие решета, которое охватывает довольно значительную часть рабочей камеры, не позволяет дробить корма повышенной влажности, а так же ведет к переизмельчению материала и получению пылевидной фракции.

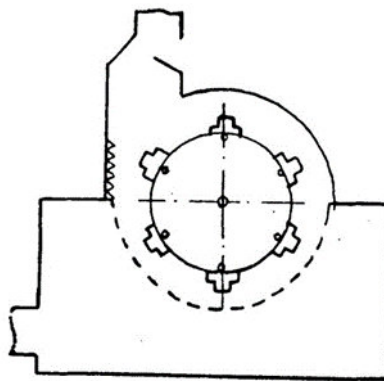


Рисунок 1.13 Схема решетной дробилки. Патент GB2076310A (Англия)

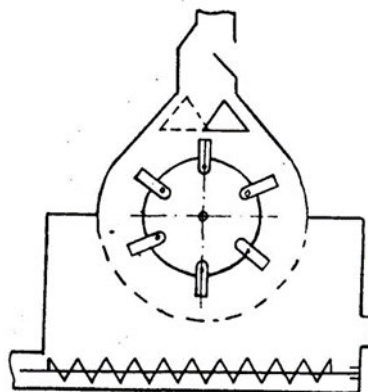


Рисунок 1.14 Схема решетной дробилки. Патент 24337872 (Франция)

Двухроторная дробилка [64] имеет большую металлоемкость, значительную энергоемкость процесса измельчения, трудоемки при обслуживании. Поэтому его применение ограничено [7,24]. Наиболее типичная конструкция представлена на рисунке 1.15.

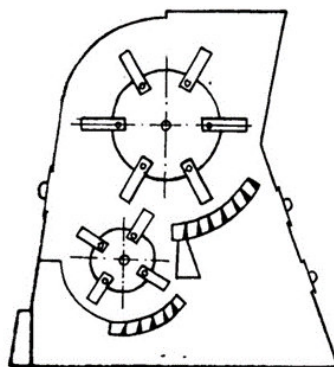


Рисунок 1.15 Схема решетной дробилки. Патент 3,224,688 (США)

1.3.2 Анализ безрешетных молотковых дробилок

Как было сказано выше, если при использовании решетных молотковых дробилок получение разного модуля помола и разной степени измельчения гарантирует наличие решета, то при использовании молотковых дробилок безрешетного типа вопрос регулирования степени измельчения остается открытым.

На сегодня известны безрешетные молотковые дробилки ДБ - 5 и ДКМ - 5, которые максимально унифицированы между собой по основным рабочим органам. Технологические операции, протекающие в процессе работы дробилки ДБ - 5 (рисунок 1.16), тесно взаимосвязаны между собой и имеют непрерывный цикл. При работе дробилки зерно из бункера подается для измельчения в рабочую камеру. Измельченное за счет действия шарнирно подвешенных молотков и дек за один неполный оборот зерно выносится из дробильной камеры в разделительную. В разделительной камере воздушно-продуктовый слой поступает на поверхность решетного сепаратора. Измельченное зерно, которое прошло через отверстия сепаратора, выгружается шнеком, а недоизмельченная фракция поступает обратно в дробильную камеру. Недостатком дробилки является наличие сепаратора, выполняющего роль решета. Практически решето только вынесено за пределы рабочей камеры дробилки.

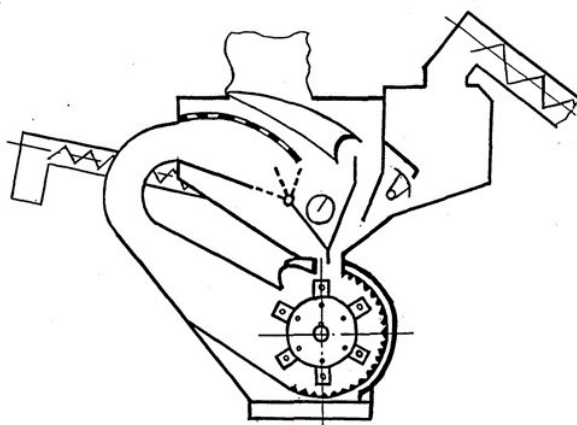


Рисунок 1.16 Конструктивно-технологическая схема безрешетной молотковой дробилки ДБ – 5

Работу дробилки ДКМ - 5 (рисунок 1.17) следует рассматривать как двухэтапный процесс, как при измельчении грубых кормов, так и при

измельчении концентрированных кормов. Работа данной дробилки, как и ДБ - 5, состоит из операций загрузки зерна, подачи на измельчение, транспортирование измельченного материала из рабочей камеры, выгрузка готовой продукции. Отличие состоит в том, что у ДКМ - 5 имеется пылеотделитель и возможность измельчения грубых кормов. Грубые корма измельчаются аналогично дроблению зерна. Недостатком является то, что при измельчении зерна применяется решето.

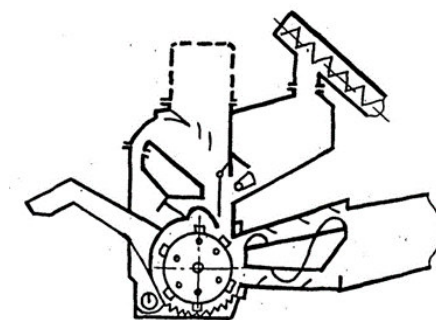


Рисунок 1.17 Конструктивно-технологическая схема безрешетной молотковой дробилки: ДБ – 5

Конструкция безрешетной дробилки ДМБ - 5 (рисунок 1.18) позволяет изменить степень измельчения за счет уменьшения или увеличения рабочего зазора между молотками и декой. В этом случае при увеличении зазора до определенной величины снижается эффект дробления и измельчаемый материал транзитом будет проходить через рабочую камеру, что недопустимо по зоотехническим требованиям.

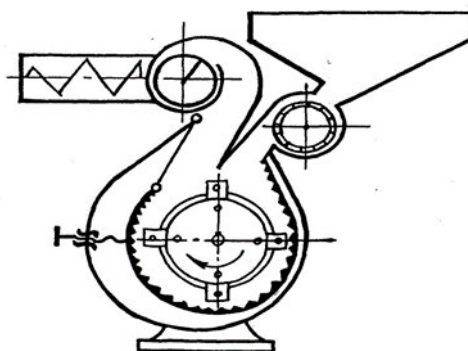


Рисунок 1.18 Конструктивно-технологическая схема дробилки ДМК – 5

Известна также молотковая безрешетная дробилка. Отличительной ее особенностью является то, что для дробления используются кольцевые молотки, а для регулирования модуля помола на пути движения воздушно-продуктового слоя из выгрузной горловины установлена пластина. Угол наклона пластины

установлен таким образом, что частицы, имеющие большую массу, а значит и большую кинетическую энергию, отражаясь от нее попадают обратно в рабочую камеру на доизмельчение. Частицы имеющие меньший вес будут проваливаться в выгрузное окно (рисунок 1.19). Меняя угол наклона пластины можно регулировать модуль помола измельчаемого материала. Слабым местом в данной конструкции является то, что во время пуска и остановки барабана будет большой дисбаланс, вследствие перемещения центра масс кольцевых молотков. Так же при повышенной влажности измельченного материала частицы будут налипать на пластину.

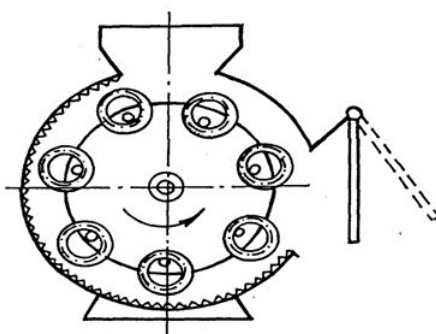


Рисунок 1.19 Конструктивно-технологическая схема дробилки
с кольцевыми молотками

Молотковые дробилки, представленные на рисунках 1.20 и 1.21 [63, 66], имеют довольно сложную и дорогую конструкцию. Что несомненно затрудняет эксплуатацию таких установок и приводит к удорожанию получаемой продукции. Кроме того эти дробилки позволяют получать помол только определенного размера, возможности регулирования модуля помола нет, что также является одним из недостатков данных конструкций. У безрешетных молотковых дробилок, как выпускаемых серийно, так и находящихся на стадии разработки, основным вопросом или слабым местом является регулирование степени измельчения.

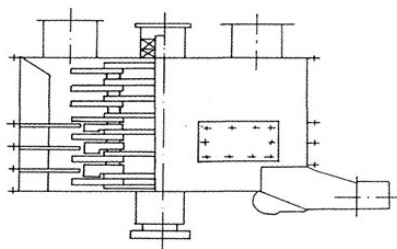


Рисунок 1.20 Схема молотковой дробилки Патент GB 2058608 (Англия)

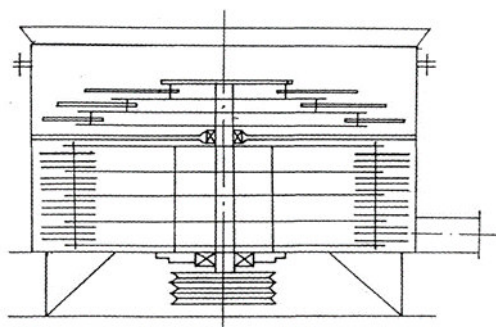


Рисунок 1.21 Схема молотковой дробилки Патент 3,214,105(США)

Безрешетные дробилки можно классифицировать по расположению вала ротора дробилки, по принципу работы и по регулированию степени измельчения или модуля помол. Также как и решетчатые дробилки, безрешетные дробилки бывают открытого и закрытого типа, одно- и многостадийные. Отличаются они и способами отвода материалов, а также возможностью регулирования степени измельчения материала. Известны различные способы регулирования степени измельчения. Например, с помощью сепаратора, как у ДБ - 5. В этом случае сепаратор выполняет роль решета, но только вынесенного из рабочей камеры.

Известны также такие способы, когда регулирование происходит за счет конструктивных изменений как ротора так и статора, а также комбинированным способом. Как показали исследования и анализ существующих конструкций, наиболее эффективным и простым способом является комбинированный способ, когда изменение степени измельчения происходит за счет интенсификации процесса дробления материала. Достигается это путем конструктивных изменений статора безрешетной дробилки и специальных устройств.

1.4 Анализ теоретических исследований рабочего процесса дробления зерна

В настоящее время известно довольно большое количество теорий измельчения. В связи с этим были предприняты попытки классифицировать эти теории по одной единой системе [22]. Существующие теории измельчения можно разделить на три группы.

В первую группу входят теории, являющиеся основой для умозрительных заключений о процессе измельчения и устанавливающие закономерности изменения гранулометрического состава измельченного материала.

Вторая группа объединяет все статистические теории, которые выражают закономерность измельчения как функции характеристик измельчаемых материалов и средств измельчения [26].

В третьей группе теорий измельчения представлены исследования, тесно связанные с физикой твердого тела. В эту группу входят классические законы П.Риттингера, В.Л.Кирпичева, П.А. Ребиндера, рабочие формулы С.В.Мельникова.

Теория измельчения твердых тел рассматривает в основном два комплекса вопросов. Во-первых, она изучает основные закономерности распределения частиц измельченного материала по их типоразмерам, или фракциям. При этом конечной целью является разработка простого и надежного метода определения средних размеров частиц измельченного материала, значений степени измельчения и т.д. Во-вторых, она изучает функциональные зависимости между затратами энергии на их процесс измельчения и степенью измельчения [86,93,101]. Это позволяет определить эффективность измельчения в зависимости от принятой технологии, конструкций машин, режимов их работы.

В основу теории дробления в молотковых дробилках заложены труды В.П.Горячкина, М.М.Гернета, С.В.Мельникова, В.А.Елисеева, С.Д.Хусида, В.И.Сыроватки, В.Р.Алешкина, Ф.Г.Плохова, П.М.Рощина, И.Е. Волкова и др. Исследованиями энергоемкости процесса дробления занимались П.Риттингер, В.Л.Кирпичев, Ф.Кик, П.Ребиндер, Ф.Бонд, А.К.Рундквист, Р.А.Родин, С.В.Мельников и др.

Научной основой теории измельчения являются законы физики твердого тела и механизм его разрушения. Массовый характер явлений при измельчении твердых

тел дает основание рассматривать процесс разрушения как стохастический, описываемый вероятностно-статистическими методами. Для оценки качественных результатов процесса измельчения кормов используют различные аналитические выражения плотности распределения текущего размера частиц X , например, Розина - Рамлера или логарифмически - нормального закона[26]:

$$f(\lg x) = \left[\frac{1}{(2,303 \cdot \sigma_z \cdot x \sqrt{2\pi})} \right] \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (1.1)$$

$$\text{где } u - \text{параметр } [u = (\lg x - \lg \bar{x}) / \sigma_z], \quad (1.2)$$

σ_z - среднее квадратичное отклонение, мкм;

$\lg \bar{x}$ - среднее арифметическое случайной величины;

x - текущий размер частиц или отверстий сит, мкм.

Логарифмически - нормальный закон более точно отражает действительную картину и является строгим теоретическим выражением.

На практике удобнее использовать эмпирическую формулу Розина-Рамлера [26]:

$$R_x = 100 e^{-bx^n}, \quad (1.3)$$

где R_x - остаток на сите с диаметром отверстий в суммарных процентах по массе;

x - средний размер частиц класса, мкм;

b, n - параметры распределения.

Исследованиями энергоемкости процесса занимаются давно. Еще в прошлом веке были выдвинуты две энергетические теории: поверхностная и объемная. Профессор П.Риттингер в 1867 году впервые выдвинул гипотезу о том, что работа, затрачиваемая на измельчение материала прямо пропорциональна вновь образованной поверхности [28]:

$$A = K \Delta F, \quad (1.4)$$

где A - работа, затрачиваемая на измельчение, Дж;

K - коэффициент пропорциональности;

ΔF - приращение поверхности.

В дальнейшем эта гипотеза была названа первым законом дробления или поверхностной теорией.

В 1874 году профессор В.Л.Кирпичев, а в 1885 профессор Кик, предположили, что энергия, затрачиваемая на измельчение, прямо пропорциональна объему деформированной части тела [56]:

$$A = \frac{\sigma_{cg}^2}{2E} V, \quad (1.5)$$

где σ_{cg} - напряжение, возникающее при деформации;

V - объем деформируемого тела;

E - модуль упругости.

Эта гипотеза была названа вторым законом дробления или объемной теорией.

В 1949 году Ф.Бонд выдвинул гипотезу, что работа, затрачиваемая на дробление, пропорциональна среднему геометрическому из объема и площади поверхности измельчаемого куска, которую он назвал третьим законом измельчения.

Академик П.А.Ребиндер предложил в 1928 г. оценивать работу измельчения как сумму работ, затрачиваемых на деформацию разрушаемых кусков и на образование поверхностей, впоследствии названную основным законом измельчения [36]:

$$A = K \Delta V + \sigma \Delta F, \quad (1.6)$$

где K, σ - коэффициенты пропорциональности;

ΔV - деформированный объем;

ΔF - вновь образованная поверхность.

Необходимо отметить, что ни одна из ранее предложенных гипотез не дает достаточно точных результатов при теоретическом определении затрат энергии на дробление, следовательно энергетические гипотезы дробления можно рассматривать приближенными. В связи с этим при выводе формулы для расчета мощности привода дробилок, учитывая значительные расхождения между теоретическими и эмпирическими данными, необходимо вводить в нее поправочные коэффициенты, полученные из экспериментальных исследований.

Используя основной закон измельчения (1.6) С.В.Мельников в 1952 г. предложил эмпирическую рабочую формулу для определения работы на дробление [26]:

$$A_{\text{изм}} = C_{\text{пр}} [C_v \lg \lambda^3 + C_s (\lambda - 1)], \quad (1.7)$$

где $A_{\text{изм}}$ - полные затраты работы на измельчение, Дж/кг;;

$C_{\text{пр}}$ - коэффициент процесса;

C_s, C_v - постоянные коэффициенты, Дж/кг;

λ - степень измельчения.

Степень измельчения определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{D_H}{dk}, \quad (1.8)$$

где D_H - средний начальный линейный размер материала, мм;

dk - средний конечный линейный размер материала, мм;

Сопоставляя вероятностному характеру процесса дробления марковский случайный процесс для степени измельчения Алешкиным В.Р. было получено следующее выражение [13]:

$$\lambda = (t + 1)^\alpha, \quad \text{или} \quad \lambda = e^{\alpha \ln(t+1)}, \quad (1.9)$$

Где t - время, с;

α - параметр процесса.

Формула (1.9) дает нам теоретически найденную зависимость степени измельчения от времени. Очевидно, что параметр процесса определяется экспериментально и должен быть меньше единицы. Иначе, чем больше работает молотковая дробилка, тем быстрее возрастает степень измельчения. На самом деле следует ожидать, что с увеличением времени степень измельчения возрастает все медленнее [33,34]. Но в любом случае из формулы (1.9) следует, что степень измельчения может возрастать неограниченно.

Процесс измельчения кормов многостадийный и теоретически продолжается до тех пор, пока измельчаемый материал находится в камере измельчения. На практике можно допустить существование предельного времени измельчения $t_{\text{пред}}$, такого, что если время переработки измельчаемого материала превышает $t_{\text{пред}}$, то дальнейшего измельчения практически не происходит [34].

Для каждой конструкции и режима работы существует максимальная степень измельчения, независимо от времени работы t . Тогда для получения меньшей степени измельчения, чем максимальная, необходимо точнее знать зависимость $\lambda(t)$, чтобы определить время вывода готового продукта без перерасхода энергии.

1.5 Выводы по главе

На основе проведения анализа конструкций существующих молотковых дробилок кормов и теорий измельчения выявлено, что современные дробилки не в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям, как в плане зоотехнических требований по качеству измельченного материала, так и по энергетическим показателям. В теории измельчения кормов остались вопросы, нерешёнными до конца, по затратам энергии. Поэтому развитие теоретических исследований по измельчению кормов и разработка новых конструкций является актуальной проблемой.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ, ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ БЕЗРЕШЕТНОЙ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

2.1 Основы теории молотковых дробилок и постановка задачи по ее приложению к расчету конструктивных параметров измельчителей кормов

Использование молотковых дробилок как машин для измельчения кормов в сельскохозяйственном производстве насчитывает не один десяток лет. Принцип работы молотковой дробилки заключается в следующем. Двигатель вращает с большой скоростью в камере дробления барабан с прикрепленными к нему молотками. Частицы измельченного материала (зернового, стеблевого и т.д.) в результате ударов молотков деформируются, дробятся, распадаются на более мелкие частицы, отбрасываются на стенки камеры (где также могут при ударе распасться на более мелкие частицы), отражаются от стенок внутрь камеры дробления, в конечном счете, вновь попадая под действие молотков. Отсюда видно, что процесс измельчения кормов многостадийный и теоретически продолжается до тех пор, пока измельчаемый материал находится в камере измельчения. На практике можно допустить существование предельного времени измельчения $t_{пред.}$, по достижению которого дальнейшего измельчения практически не происходит.

Научной основой теории измельчения являются законы физики твердого тела и механизм его разрушения [38]. Массовый характер явлений при измельчении твердых тел дает основание рассматривать процесс разрушения как стохастический, описываемый вероятностно-статистическими методами.

Теория молотковых дробилок в сжатом виде приведена С.В. Мельниковым [80,91].

Целью теории является расчет конструктивных элементов дробилки, обеспечивающих при заданной степени измельчения наивысшую пропускную способность с наименьшими энергетическими затратами. В ее основе лежит представление о стохастическом характере рабочего процесса дробилки, соответствующем марковскому случайному процессу «гибели и размножения». При этом процессы «размножения» обусловлены дроблением материала, а «гибели» - прохождением его через решето барабана.

Среди параметров, фигурирующих в теории, наиболее важными являются следующие:

λ - степень измельчения;

α , μ - параметры процессов «размножения» и «гибели»;

$v_{уд}$ - скорость удара молотка;

$z_{уд}$ - количество ударов, необходимое для получения заданной степени измельчения;

t - время пребывания материала в камере (время обработки);

$K_{ц}$ - кратность циркуляции;

$M_{ц}$ - масса циркулирующей загрузки.

Для оценки качественных результатов процесса измельчения кормов используют различные аналитические выражения плотности распределения текущего размера частиц x , например, Розина – Раммлера или логарифмически – нормального закона [129]:

$$f(\lg x) = \left[\frac{1}{(2,303\sigma_z x \sqrt{2\pi})} \right] \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (2.1)$$

$$\text{где } u - \text{параметр } [u = (\lg x - \overline{\lg x})/\sigma_z]; \quad (2.2)$$

σ_z – среднеквадратичное отклонение, мкм;

$\overline{\lg x}$ – среднее арифметическое случайной величины $\lg x$;

x – текущий размер частиц или отверстий сит.

Проверка по критериям согласия показала, что логарифмически – нормальный закон более точно отражает действительную картину и является строгим теоретическим выражением.

На практике удобнее использовать эмпирическую формулу Розина – Раммлера:

$$R_x = 100e^{-bx^n}, \quad (2.3)$$

где R_x – остаток на сите с диаметром отверстий x в суммарных процентах по массе;

x – средний размер частиц класса, мкм;

b , n – параметры распределения.

Наряду с законами распределения частиц продуктов измельчения большое значение имеют функциональные зависимости между затратами энергии на процесс измельчения материала и степенью измельчения.

При изучении этой функциональной зависимости измельчения исходят из того, что количество энергии, необходимое для измельчения исходного материала, зависит от многих факторов: характеристики и состояния измельчаемого материала (прочности, однородности, хрупкости, влажности и т.д.), конструктивных и технологических особенностей измельчающих машин (молотковые дробилки, измельчители дисковые, барабанные, вальцовые и др.). Поэтому очень сложно установить теоретическую зависимость между затратами энергии на измельчение, физико-механическими свойствами измельчаемого материала и степенью измельчения, такую зависимость обычно представляют в более общем виде.

В технике степенью измельчения материала принято называть отношение среднего размера кусков исходного материала к среднему размеру частиц продукта измельчения.

Степень измельчения λ определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{D_H}{d_k}, \quad (2.4)$$

где D_H – средний начальный линейный размер материала, мм;

d_k – средний конечный линейный размер материала, мм.

Одной из важнейших характеристик кинетики процесса дробления является время измельчения материала в рабочей камере дробилки. При определенных условиях аналогом ее можно принять число ударов, полученных частицей за время дробления. Это число зависит как от прочностных свойств измельчаемого материала, так и от скорости соударений молотков и частиц измельчаемого материала. Алешкиным В.Р. установлено, что число ударов, необходимое для достижения определенной степени измельчения λ , является величиной случайной и имеет логарифмически-нормальное распределение.

Рассмотрим два процесса, имеющих место в рабочей камере дробилки. Первый процесс «чистого размножения» протекает, когда поступивший в рабочую камеру материал измельчается без отвода измельченных частиц. Рассматривая процесс дробления с учетом его вероятностного характера как марковский случайный процесс, В.Р. Алешкин, решая системы вероятностных дифференциальных уравнений, получил для степени измельчения следующее выражение:

$$\lambda = (t + 1)^\alpha \text{ или } \lambda = e^{\alpha \ln(t+1)}, \quad (2.5)$$

где t – время, с;

α – параметр процесса.

Из этих уравнений можно определить параметр процесса

$$\alpha = \frac{\lg \lambda}{\lg(t+1)}. \quad (2.6)$$

Формула (2.5) дает нам теоретически найденную зависимость степени измельчения от времени. Очевидно, что параметр процесса α определяется экспериментально и должен быть меньше единицы. Иначе, чем продолжительнее работает молотковая дробилка, тем быстрее возрастает степень измельчения λ . На самом деле следует ожидать, что с увеличением времени t степень измельчения λ возрастает все медленнее. Но в любом случае из формулы (2.5) следует, что степень измельчения может возрастать неограниченно.

Как было отмечено ранее, процесс измельчения кормов многостадийный и теоретически продолжается до тех пор, пока измельчаемый материал находится в камере измельчения. На практике можно допустить существование предельного времени измельчения $t_{\text{пред}}$, такого, по достижении которого дальнейшего измельчения практически не происходит.

Очевидно, что для каждой конструкции и режима работы существует максимальная степень измельчения, независимая от времени работы дробилки. Тогда для получения меньшей степени измельчения, чем максимальная, необходимо знать точную зависимость $\lambda(t)$, чтобы определить время вывода готового продукта с целью минимизации затрат энергии.

Другим, параллельно протекающим в рабочей камере процессом, является процесс прохождения измельченных частиц через решето, который также можно описать уравнениями кинетики.

Рассматривая оба процесса совместно, получено [125,129] уравнение кинетики:

$$G = G_0 e^{\alpha \cdot \ln(t+1) - \mu t}, \quad (2.7)$$

где G_0 - число частиц в камере при $t = 0$;

G - число частиц в момент t ;

μ - параметр процесса прохождения частиц через решето.

Движение измельчаемого материала в рабочей камере характеризуется кратностью циркуляции, то есть число оборотов, которое совершит материал за время t до достижения степени измельчения λ . Она определяется по формуле:

$$K_{ц} = \frac{tv_{сл}}{\pi D_{б}}, \quad (2.8)$$

где $D_{б}$ - диаметр барабана;

$v_{сл}$ – скорость циркулирующего слоя;

$K_{ц}$ – кратность циркуляции.

Если массу циркулирующей загрузки обозначить $M_{ц}$; а q – производительность дробилки, то

$$M_{ц} = qt \text{ и } K_{ц} = \frac{M_{ц}v_{сл}}{q\pi D_{б}}. \quad (2.9)$$

Исследованиями Ф.Г. Плохова [87] установлено, что $v_{сл} \approx (0,4 \div 0,5) \cdot v_{м}$, а $K_{ц}$ колеблется в довольно больших пределах и зависит от прочностных свойств измельчаемого материала, степени измельчения λ и окружной скорости молотков $v_{м}$.

Конструкции универсального измельчителя и дробилки кормов, разработанных автором, являются безрешетными и содержат ряд новых конструктивных элементов. Поэтому выводы существующей теории не могут быть непосредственно применены для его расчета в той части, которая касается эффективности измельчения и определения потребной мощности. При модификации теории следует получить новые уравнения кинетики процесса дробления, учтя отсутствие в дробилках решета, наличие и расположение бичей и других конструктивных особенностей.

2.2 Основы теории энергетических затрат молотковой дробилки

Рабочий процесс измельчения кормов в молотковой дробилке можно разбить на три последовательных стадии [128]:

- подача исходного материала (питание);
- переработка материала (измельчение);
- отвод конечного продукта (эвакуация).

Все три стадии могут быть совмещены во времени, тогда в процессе работы молотковых дробилок непрерывно происходит подача исходного материала, его измельчение материала и отвод готового продукта.

С физической точки зрения в процессе работы молотковой дробилки часть кинетической энергии вращающегося барабана преобразуется в энергию измельчения исходного материала. Одной из задач теории молотковых дробилок является ответ на вопросы, какая часть кинетической энергии барабана (точнее, энергии двигателя, приводящего барабан в движение) идет на полезную работу – измельчение корма, и как, в конечном счете, сократить потери энергии.

Основой анализа рабочего процесса молотковых дробилок служит теория удара В.П. Горячкина.

Как было сказано выше, для определения работы измельчения было предложено несколько подходов и известные теории позволяют представить основной закон измельчения в виде:

$$A_T = A_V + A_S, \quad A_{\text{изм.}} = C_{\text{пр.}} A_T, \quad (2.10)$$

где A_T - теоретические затраты работы на процесс измельчения;

A_V - затраты энергии на деформацию измельчаемого материала;

A_S - затраты энергии на приращение удельной площади;

$A_{\text{изм.}}$ - полные затраты работы на измельчение с учетом влияния способа измельчения и конструкции измельчителя.

Тогда

$$A_{\text{изм.}} = C_{\text{пр.}} A_T = C_{\text{пр.}} (A_V + A_S) = C_{\text{пр.}} (A_V + C_S (\lambda - 1)),$$

где C_S - коэффициент, учитывающий работу, затрачиваемую на образование новых поверхностей;

$C_{\text{пр.}}$ - коэффициент, характеризующий влияние неучтенных факторов.

Или, учитывая:

$$A_{\text{изм.}} = C_1 l g \lambda^3 + C_2 (\lambda - 1), \quad (2.11)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты, которые определяются по результатам производственных испытаний.

Величину $A_{изм.}$ можно использовать в качестве критерия энергоемкости при сравнительной оценке разных машин или при выборе эффективных режимов их работы.

Работа измельчения $A_{изм.}$ является частью полезной работы $A_{пол.}$, складывающейся из работы деформации измельчаемого материала (упругой, неупругой и т.д.; считается, что дробление происходит, когда деформации превышают допустимые) и кинетической энергии измельчаемого материала, также идущей при столкновении частиц материала со стенками на разрушение материала:

$$A_{пол.} = A_{деф.} + A_{кин.} = (1 - K_{упр.}^2) \frac{mv_{н.}^2}{2} + \frac{mv_{к.}^2}{2}, \quad (2.12)$$

где $K_{упр.}$ - коэффициент восстановления (характеризующий упругие свойства частиц измельчаемого материала);

$v_{н.}, v_{к.}$ - начальная, конечная скорости молотков.

Если учесть, что измельчаемый материал циркулирует в дробильной камере в виде продуктово-воздушного слоя толщиной $h_{сл.}$ с плотностью ρ и массовой долей его в слое μ , то энергия, расходуемая барабаном дробилки на удары по слою и истирание по слою, может быть определена по формуле:

$$A_{деф} = \psi DL(1 + f_{сл.})v_{отн.}^2, \quad (2.13)$$

где D, L - диаметр и длина барабана;

$f_{сл.}$ - коэффициент сопротивления слоя движению барабана;

$v_{отн.}$ - скорость молотков барабана относительно слоя;

ψ - коэффициент, характеризующий конструктивно-технологические особенности рабочей камеры.

Величины ψ и $f_{сл.}$ определяются фактически опытным путем.

Мощность, развиваемую двигателем молотковой дробилки, можно представить в виде [114]

$$N = N_{изм.} + N_{ц} + N_{х.х.}, \quad (2.14)$$

где $N_{ц}$ - мощность, расходуемая на циркуляцию материала;

$N_{х.х.}$ - мощность холостого хода.

Рассмотрим вклады в (2.14):

$$N_{\text{изм.}} = qA_{\text{изм.}} = q\psi DL(1 + f_{\text{сл.}})v_{\text{отн.}}^2 \quad (2.15)$$

где q - производительность дробилки.

$$N_{\text{ц}} = K_{\text{в}}(1 + K_{\text{ц}}\mu_{\text{ц}})v_{\text{м}}^3, \quad (2.16)$$

по аналогии с известной формулой вентилятора ($N_{\text{в}} = K_{\text{в}}v_{\text{м}}^3$),

где $K_{\text{ц}}$ - кратность циркуляции материала;

$\mu_{\text{ц}}$ - коэффициент концентрации материала;

$v_{\text{м}}$ - скорость молотков;

$K_{\text{в}}$ - коэффициент, учитывающий конструкцию и режим работы вентилятора.

Мощность холостого хода предусматривает работу со снятыми молотками, т.к. затраты на вентиляцию воздуха уже учтены в $N_{\text{ц}}$.

Из-за отсутствия экспериментальных данных обычно принимают

$$N_{\text{х.х.}} = (0,15 \dots 0,2)N_{\text{изм.}} \quad (2.17)$$

Отметим, что для определения производительности молотковой дробилки [88] предлагается использовать эмпирическую формулу

$$q = (2 \dots 8)10^{-5} \rho D^2 L \omega. \quad (2.18)$$

Энергия, расходуемая в единицу времени на процесс измельчения [5]:

$$N_{\text{изм}} = P v_{\text{м}},$$

где P - суммарное окружное усилие барабана, затрачиваемое на удары молотков по материалу и на перемещение продуктово - воздушного слоя.

Если сопротивление дек и решета оценивать величиной

$$F = f_{\text{п}} P,$$

где $P = \frac{qv_{\text{м}}}{1 - f_{\text{п}}}$, то тогда

$$f_{\text{п}} = 1 - \frac{v_{\text{м}}^2}{qA_{\text{изм.}}}$$

По опытным данным [125], для молотковых дробилок:

$$f_{\text{п}} \cong 0,8 \dots 0,9 \text{ при } v_{\text{м}} = 80 \dots 100 \text{ м/с.}$$

В качестве основных технико-экономических показателей используют удельный расход энергии

$$W = \frac{N}{q}, \quad (2.19)$$

энергоёмкость процесса с учетом степени измельчения

$$\Xi = \frac{N_{\text{изм.}}}{q\lambda}, \quad (2.20)$$

а также обратные им величины, называемые соответственно «общая эффективность» и «относительная механическая эффективность».

Рассмотрим вышеприведенные формулы и пределы их применимости. Формула (2.12) получена на основе так называемого «основного закона измельчения Ребиндера», суммирующего выводы поверхностной и объемной теории измельчения. Обе теории используются здесь для задания качественной зависимости $A_{\text{изм.}}$ от степени измельчения λ (выводы приведены для сильно идеализированных случаев, но можно предполагать, что качественная зависимость $A_{\text{изм.}}(\lambda)$ при уточнении существенно не изменится). В данном случае первостепенное значение имеет само понятие $A_{\text{изм.}}$. Если величину $A_{\text{изм.}}$ рассматривать как собственно работу разделения частиц исходного материала на более мелкие, то она непосредственно неизмерима. И, понятно, что она существенно зависит от способа измельчения, а следовательно, коэффициенты C_1 и C_2 (формула 2.11) определяются экспериментально для каждого вида исходного материала при данном способе измельчения, т.е. для данной конструкции в данном режиме. При каких-либо изменениях следует ожидать и изменения этих коэффициентов.

Выше уже говорилось, что для каждой конструкции и режима работы существует максимальная степень измельчения, независимо от времени работы. Тогда для получения меньшей степени измельчения, чем максимальная, необходимо точнее знать зависимость $\lambda(t)$, чтобы определить время вывода готового продукта без перерасхода энергии.

Формулы (2.12) – (2.18) позволяют оценить КПД процесса измельчения.

Как уже было сказано, $A_{\text{изм.}}$ представляет собой часть кинетической энергии барабана и в формуле (2.13) представлена через квадрат относительной скорости барабана относительно материального слоя и площадь диаметрального сечения барабана (практически совпадающую с площадью поперечного сечения дробильной камеры) с включением двух коэффициентов ψ и $t_{\text{сл.}}$, определяемых

экспериментально. Формула (2.13) используется в дальнейшем в (2.15) для определения мощности, идущей на измельчение. Отмечалось, что $A_{\text{изм.}}$ (или $A_{\text{пол.}}$) в (2.12) и (2.13), должна существенно зависеть от конструкции и режима работы измельчающего устройства, что и должно проявиться в экспериментально определяемых коэффициентах. Формула (2.14) представляет потребляемую мощность как сумму трех вкладов: мощности, идущей на измельчение в смысле формул (2.12) и (2.13), мощности, расходуемой на циркуляцию материала и мощности холостого хода. О вычислении $N_{\text{изм.}}$ уже говорилось. Второй вклад $N_{\text{ц}}$ рекомендуется вычислять сопоставляя барабан с вентилятором, приводящим в движение продуктово – воздушную смесь. Под холостым ходом понимается работа со снятыми молотками и, на наш взгляд, эта мощность вполне определяется экспериментально. Однако выясняется, что это самый неопределенный вклад и он обычно принимается равным 15 – 20 % от $N_{\text{изм.}}$ - формула (2.17).

2.3 Теоретический расчет пропускной способности дробилки кормов

При рассмотрении теоретических вопросов разработки безрешетных дробилок необходимо учитывать, что в конце процесса измельчения размеры частиц материала варьируются в широких пределах: от крупных частиц до частиц, размер которых значительно меньше среднего. Это обстоятельство может оказать существенное влияние на формулы, по которым производится расчет энергозатрат, производительности, степени измельчения, поскольку последние получены, как правило, в предположении об одинаковом размере частиц конечного продукта [58,75]. Поэтому необходимо учесть в теории молотковых дробилок распределение по размерам раздробленных частиц.

Для решения этой проблемы необходимо рассмотреть ряд промежуточных задач:

- 1) расчет зависимости степени измельчения от времени дробления частиц, находящихся в камере;
- 2) установление вида статистического распределения этих частиц по размерам;

2) расчет с учетом этого распределения затрат энергии, производительности и других искомых величин.

Для нахождения искомых величин необходимо знать кинетику процесса дробления материала [32,40,59,70,96,104]. При этом невозможно заранее точно предсказать, за сколько ударов данный кусок будет измельчен.

Это связано с большим числом факторов, влияющих на процесс движения и дробления материала в дробилке [35,42,60,67,82,107,116,119]. Однако подобный процесс можно описать, используя вероятностный подход [83]. Основополагающими работами в этой области являются работы С.В. Мельникова, В.Р. Алешкина, применивших теорию марковских случайных процессов для описания кинетики измельчения.

2.4 Математическое моделирование рабочего процесса безрешетной молотковой дробилки

2.4.1 Математическое описание степени измельчения в общем случае

Основное уравнение, используемое в статистической теории молотковых дробилок, имеет вид [96]:

$$\frac{d}{dt} P_n(t) = -i_n P_n(t) + i_{n-1} P_{n-1}(t), \quad (2.21)$$

где $P_n(t)$ – вероятность того, что через время t от начала дробления имеется n частиц дробимого материала;

i_n – коэффициент, характеризующий процесс дробления.

Совокупность уравнений вида (2.21) для различных n дает нам систему обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка для определения $P_n(t)$. Дальнейший ход решения зависит от выбора коэффициентов i_n . В процессе теоретических исследований рассматривалось несколько путей учета зависимости i_n от числа частиц n .

Как правило, считается [6], что:

$$i_n = ni, \quad (2.22)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} n^2 P_n = \sum_{n=1}^{\infty} (n-1)^2 P_{n-1},$$

получаем:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{i_0}{(\delta+t)^\alpha} M(t). \quad (2.28)$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем:

при $\alpha = 1$

$$\begin{aligned} \frac{dM(t)}{M(t)} &= \frac{i_0}{(\delta+t)} d(t), \\ \int_{M(0)}^{M(t)} \frac{dM(t)}{M(t)} &= i_0 \int_0^t \frac{d(t)}{\delta+t}, \\ \ln M(t) - \ln M(0) &= i_0 \ln(\delta+t) - i_0 \ln \delta, \\ \ln \frac{M(t)}{M(0)} &= i_0 \ln \frac{t+\delta}{\delta} \end{aligned}$$

или

$$\lambda(t) = \frac{M(t)}{M(0)} = \left(\frac{t+\delta}{\delta} \right)^{i_0},$$

где $\lambda(t)$ – степень измельчения.

Таким образом, поскольку $M(0) = 1$ при $\alpha = 1$

$$\lambda(t) = M(t) = \left(\frac{t}{\delta} + 1 \right)^{i_0}. \quad (2.29)$$

Очевидно, что при $\delta=1$ зависимость (2.29) совпадает с результатами работы [6].

При $\alpha \neq 1$ из соотношения (2.28) после разделения переменных имеем:

$$\frac{dM(t)}{M(t)} = \frac{i_0}{(\delta+t)^\alpha} d(t).$$

После интегрирования

$$\begin{aligned} \ln \frac{M(t)}{M(0)} &= \frac{i_0}{(1-\alpha)} (t+\delta)^{1-\alpha} - \frac{i_0}{(1-\alpha)} \delta^{1-\alpha} \quad \text{или} \\ \lambda(t) &= \exp \left\{ \frac{i_0 \delta^{(1-\alpha)}}{(1-\alpha)} \left[\left(\frac{t}{\delta} + 1 \right)^{(1-\alpha)} - 1 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.4.2 Определение предельно достижимого уровня степени

измельчения

Известно [39,73,115], что по мере работы молотковой дробилки процесс дробления постепенно замедляется и с течением времени дальнейшего измельчения практически не происходит. Рассмотрим причины этого явления. Для распада частицы необходима энергия E_g , которая может быть определена по характеристикам прочности измельчаемого материала, при этом энергия удара E_r должна быть не меньше E_g .

При хаотическом движении, в результате воздействия рабочих органов молотковой дробилки, частица приобретает скорость $\vec{\vartheta}_r$, которая имеет произвольное направление. Скорость ее относительно молотков, двигающихся со скоростью $\vec{\vartheta}_m$, будет равна:

$$\vec{\vartheta}_0 = \vec{\vartheta}_r + \vec{\vartheta}_m. \quad (2.31)$$

Наибольшее абсолютное значение скорости при упругих отражениях от молотков и бичей достигается в том случае, когда частица отскакивает навстречу молотку:

$$\vartheta_{m_{max}}. \quad (2.32)$$

Тогда максимальную энергию удара можно записать как

$$E \frac{m_k \vartheta_{max}^2}{2 \frac{m_k^4 \vartheta_m^2}{2} k_{mrmax}}, \quad (2.33)$$

где m_k – масса частиц.

Очевидно, что если выполняется условие $E_{rmax} \geq E_g$, то происходит распад частиц измельчаемого материала. Другими словами, условие распада:

$$m_k 2\vartheta_m^2 \geq E_g. \quad (2.34)$$

Отсюда следует, что для осуществления процесса дробления масса частицы должна удовлетворять условию:

$$m_k \geq \frac{E_g}{2\vartheta_m^2}. \quad (2.35)$$

А минимальная масса частиц, которая может быть получена при дроблении, может быть оценена как

$$m \frac{E_g}{2\vartheta_{min}^2}. \quad (2.36)$$

Очевидно, что энергии удара частиц, имеющих массу меньше $m_{\min}$, становится недостаточно для дробления. Тогда максимальную степень измельчения можно определить по формуле [45]:

$$\lambda \frac{d_n}{d_k} = \sqrt[3]{m_n \frac{2\vartheta_M^2}{Eg} \sqrt{\frac{m_n}{m_{\min_{\max}}}}}, \quad (2.37)$$

где d_n , d_k – соответственно «начальные» и «конечные» средние линейные размеры;

m_n , $m_{\min}$ – соответственно «начальная» и «минимальная» масса частицы.

Подробное исследование полученных результатов было проведено с помощью ЭВМ.

Расчеты, проведенные на ЭВМ [61,77], в соответствии с (2.30) с учетом существования $\lambda_{\max}$ позволяют по экспериментальным данным определять параметры, раскрывающие технологические возможности безрешетной молотковой дробилки. Эти параметры могут быть подобраны таким образом, чтобы оптимизировать энергетические затраты на дробление. В частности, поскольку степень измельчения зависит от времени нелинейно (рисунок 2.1),

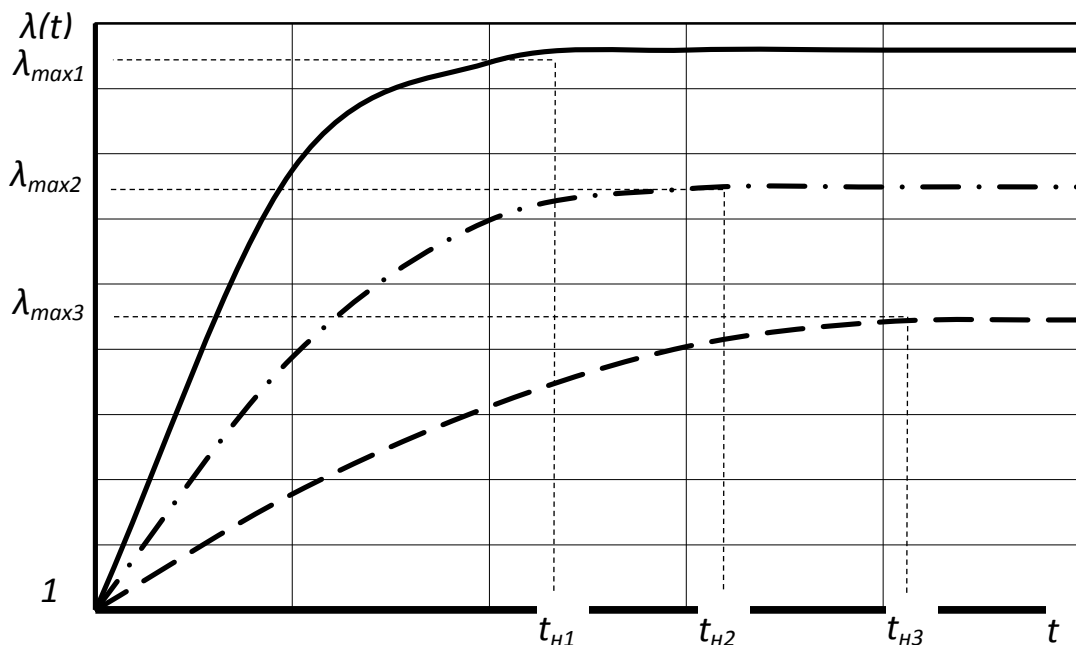


Рисунок 2.1 – Теоретические зависимости степени измельчения $\lambda(t)$ от времени t

достигая насыщения с ростом времени дробления, то для понижения энергозатрат параметры конструкции безрешетной дробилки должны быть подобраны таким

образом, чтобы необходимая степень измельчения достигалась при достаточно малом времени дробления $t \leq t_n$, где t_n – номинальное время дробления, при котором достигается максимальная степень измельчения при данных условиях.

Для увеличения максимального значения степени измельчения $\lambda_{\max}$ необходимо, как следует из (2.37), увеличивать относительную скорость соударений частиц измельчаемого материала и молотков.

Поскольку в безрешетной дробилке открытого типа процесс дробления происходит за время одного оборота материала, то особое внимание необходимо уделить интенсивности дробления, чтобы выполнялось ограничение, накладываемое на продолжительность дробления, а именно соблюдалось условие $t \leq t_n$. Однако, микроскопическое рассмотрение процесса дробления позволяет сделать вывод о том, что интенсивность должна, в первую очередь, явно зависеть от объема частиц (или от их числа), и только потом от времени.

2.4.3 Математическое описание степени измельчения с учетом зависимости интенсивности дробления от числа частиц

Рассмотрим подход, основанный на предположении, что интенсивность дробления зависит от объема или числа частиц.

Допустим, что в основном уравнении статистической теории дробления (2.21) коэффициент $i_n = n \delta_n$, тогда оно примет вид:

$$\frac{dP_n}{dt} = -n\delta_n P_n + (n-1)\delta_{n-1} P_{n-1}. \quad (2.38)$$

Из этого выражения вытекает следующее уравнение для математического ожидания $M(t)$ числа частиц в момент времени t , полученное аналогично уравнению (2.28):

$$\frac{dM(t)}{dt} = \sum_{n=1}^{\infty} n \delta_n P_n(t). \quad (2.39)$$

Дальнейшее решение зависит от вида δ_n .

Предположим, что:

$$\delta_n = \frac{\delta}{n^\alpha}, \alpha > 1,$$

тогда

$$\frac{dM}{dt} = \delta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{(\alpha-1)}} P_n. \quad (2.40)$$

В случае, когда среднеквадратичное отклонение $\sigma(t)$ много меньше $M(t)$, можно предположить, что:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{(\alpha-1)}} P_n(t) \approx \frac{1}{M(t)^{(\alpha-1)}}. \quad (2.41)$$

Тогда имеем

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{\delta}{M(t)^{\alpha-1}}. \quad (2.42)$$

После разделения переменных:

$$M(t)^{\alpha-1} dM(t) = \delta dt.$$

Интегрируя, получаем

$$\frac{1}{\alpha} M(t)^\alpha \Big|_{M(0)}^{M(t)} = \delta t \Big|_0^t$$

или

$$\frac{1}{\alpha} [M(t)^\alpha - M(0)^\alpha] = \delta t.$$

Учитывая, что $M(0) = 1$, имеем

$$\frac{1}{\alpha} M(t)^\alpha - \frac{1}{\alpha} = \delta t,$$

$$M(t)^\alpha = \alpha \left(\delta t + \frac{1}{\alpha} \right),$$

$$M(t) = (1 + \alpha \delta t)^{\frac{1}{\alpha}}.$$

Так как при $M(0) = 1$

$$\lambda(t) = M(t) = (1 + \alpha \delta t)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (2.43)$$

Формула (2.43) значительно отличается от обобщенной формулы (2.29).

2.4.4 Изучение степени измельчения с учетом ее предельного значения

Заметим, что число частиц n в измельчающем устройстве всегда конечно. Для любого начального числа частиц n_0 , при данном режиме работы молотковой дробилки, существует свое предельно возможное конечное число частиц $N(n_0)$, так как процесс дробления ограничен наименьшей массой частиц (2.37), то есть

$$n \leq N(n_0) \quad (2.44)$$

в любой момент времени. Это означает, что по мере работы молотковой дробилки процесс измельчения постепенно замедляется. По истечении некоторого времени дальнейшего измельчения практически не происходит, и число частиц не изменяется.

Характерными особенностями процесса дробления в данном случае являются следующие моменты.

Во-первых, в процессе дробления безрешетной молотковой дробилкой, имеющей разомкнутый цикл, интенсивность дробления снижается к концу каждого цикла.

Во-вторых, снижение интенсивности дробления происходит ввиду уменьшения размеров частиц.

В-третьих, число частиц в измельчаемом устройстве всегда конечно, так как процесс дробления прекращается на некотором этапе путем отбора измельченного продукта, либо из-за малого размера частиц.

Следовательно, $P'_n(t)$ постепенно убывает до нуля с увеличением n . Поэтому предположим, что коэффициент i_n в системе уравнения (2.21) имеет вид:

$$i_n = (N - n)i(t), \quad (2.45)$$

где $n_0 \leq n \leq N(n_0)$.

Тогда система уравнений (2.21) примет вид:

$$\frac{dP_n}{dt} = i(t)[N_0(P_{n-1} - P_n) + nP_n - (n-1)P_{n-1}], \quad (2.46)$$

с начальными условиями: $P_n(0) = 0$

$$P_n(0) = \delta_{nn_0} = \begin{cases} 1, & n = n_0 \\ 0, & n \neq n_0 \end{cases}$$

Умножим выражение (2.46) на n и просуммируем полученные уравнения.

Тогда, после преобразования получим:

$$\frac{dM(t)}{dt} = i(t)[N - M(t)]. \quad (2.47)$$

В итоге получили линейное дифференциальное уравнение относительно среднего числа частиц в дробильной камере $M(t)$, содержащее два феноменологических параметра $i(t)$ и N , которые можно уточнить по результатам эксперимента.

Разделяя переменные, получаем

$$\frac{dM(t)}{N-M(t)} = i(t)dt.$$

Интегрируя

$$\int \frac{dM(t)}{N-M(t)} = \int_0^t i(t)dt,$$

$$\ln(N - M(t)) = - \int_0^t i(t)dt + C,$$

$$N - M(t) = C \exp\left(- \int_0^t i(t)dt\right),$$

или

$$M(t) = N - C \exp\left(- \int_0^t i(t)dt\right), \quad (2.48)$$

где C – постоянная интегрирования.

Учитывая, что $M(0) = n_0$, получим

$$M(t) = N - (N - n_0) \exp\left(- \int_0^t i(t)dt\right). \quad (2.49)$$

Отсюда степень измельчения :

$$\lambda(t) = \frac{M(t)}{n_0} = \lambda_n - (\lambda_n - 1) \exp\left(- \int_0^t i(t)dt\right), \quad (2.50)$$

где λ_n – предельно достижимая степень измельчения, определяемая конструкцией дробилки, режимом ее работы, свойствами измельчаемого материала, которая определяется как отношение:

$$\lambda_n = \frac{N}{n_0}. \quad (2.51)$$

При $i(t) = i_0$ получим

$$\lambda(t) = \lambda_n - (\lambda_n - 1) \exp(- i_0 t), \quad (2.52)$$

То есть $\lambda(t)$ возрастает асимптотически, стремясь к λ_n по экспоненте (рисунок 2.2).

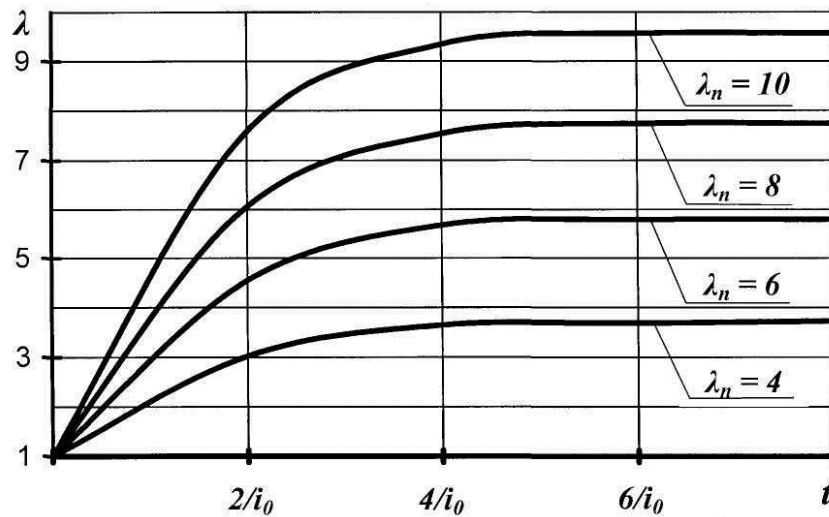


Рисунок 2.2 – Теоретическая зависимость степени измельчения λ от времени t для различных значений λ_n , рассчитанная по формулам (2.52)

Подставляя (2.24) в уравнение (2.50), получим:

$$\lambda(t) = \lambda_n - (\lambda_n - 1) \exp \left\{ -\frac{i_0 \delta^{(1-\alpha)}}{1-\alpha} \left[\left(\frac{t}{\delta} + 1 \right)^{1-\alpha} - 1 \right] \right\}, \text{ при } \alpha \neq 1 \quad (2.53)$$

и

$$\lambda(t) = \lambda_n - (\lambda_n - 1) \left(\frac{t}{\delta} + 1 \right)^{-i_0} \text{ при } \alpha = 1. \quad (2.54)$$

Полученная теоретическая зависимость (2.53) подтверждается экспериментальными данными в главе 4.

2.5 Расчёт конструктивно- технологических параметров дробилки кормов

При аналитическом рассмотрении процесса дробления на базе основного уравнения статистической теории трудно учесть в общем виде зависимость вероятности дробления частицы при ударе от ее массы (объема). Однако, очевидно, что эта зависимость оказывает значительное влияние на процесс дробления и поэтому должна как можно точнее учитываться при расчете конструктивных параметров.

Для теоретического изучения этого вопроса рассматривается имитационная модель процесса дробления, реализованная на ЭВМ и основанная на следующих предположениях:

1. При каждом ударе любая частица может разбиваться только на две частицы одинакового объема;

2. Вероятность дробления при ударе зависит от массы (объема) частицы по задаваемому закону.

При расчетах предполагается, что в начальный момент времени имеется одна частица единичного объема, которая подвергается заданному числу ударов. После каждого удара подсчитывается число частиц, имеющих объемы 1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, а также подсчитывается степень измельчения и энергия, затраченная на дробление, которая рассчитывается по поверхностной теории. Расчеты завершаются либо тогда, когда будут совершены все заданные удары, либо тогда, когда разобьется одна из частиц объема 1/32. Затем опыт повторяется.

После завершения серии опытов, число которых задается, для каждого удара рассчитывается средняя степень измельчения и затраченная энергия. Эта модель реализована на ПЭВМ.

В заключение можно отметить, что в работах Алешкина В.Р. предполагалось, что коэффициент дробления i_n в уравнении (3.2.) пропорционален числу частиц. Получается, что чем больше становится частиц, тем быстрее идет процесс дробления. Чтобы этого не было Алешкин В.Р. делает

второе предположение: $i = \frac{i_o}{(1 + t)}$. Проведенные теоретические исследования

позволили нам обобщить формулу Алешкина В.Р. введением двух параметров α и δ . При $\alpha = \delta = 1$ получается зависимость (2.22.). Формулы (2.43, 2.53) позволяют предположить, что коэффициент дробления i_n должен зависеть фактически от числа частиц i , уже через это число, от времени. Формула (2.43) исходит из того, что процесс измельчения не прекращается, пока работает измельчитель. А формула (2.53) предполагает существование для каждой конструкции и режима работы своего предела измельчения.

Как отмечалось в данном разделе для конкретизации полученных теоретических зависимостей необходимо экспериментальным путем определить числовые параметры процесса дробления в безрешетной молотковой дробилке, при этом оценить адекватность вышеуказанных теоретических зависимостей результатам эксперимента.

Технологические и конструктивные расчеты дробилки зерна

Технологический результат работы дробильной машины оценивают тремя основными характеристиками:

- 1) размер раздробленных частиц;
- 2) их форма;
- 3) распределение частиц по размерным классам.

Несмотря на широкое распространение в технике и науке, процесс дробления теоретически мало изучен и еще недостаточно практически освоен. На современных измельчающих машинах производственного типа нельзя достичь точных размеров, определенной формы и наперед заданного распределения по размерным классам частиц раздробленного материала. Объясняется это прежде всего тем, что процесс дробления зависит от очень многих причин, частично совершенно случайных, поэтому по своему характеру весьма сложен.

Основные факторы, влияющие на процесс дробления, сводятся к следующему:

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.

Дробление не только по количеству затрачиваемой энергии, но и по износу рабочих частей машины относительно весьма дорогой технологический процесс, и поэтому основной принцип дробления во всех отраслях, где измельчение материалов производят в производственных масштабах, — не дробить ничего лишнего.

Выполнением этого требования достигают:

- 1) уменьшения расхода энергии;
- 2) увеличения производительности;
- 3) уменьшения износа рабочих частей машины.

Возможно более точное дробление до заданных размеров уменьшает пылеобразование. Пыль нежелательна в техническом, гигиеническом и экономическом отношениях. Она повышает износ машины, а также и расход энергии, так как увеличивает трение, затрудняет обслуживание и вредна для людей и животных, так как засоряет их дыхательные пути. 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.

Ни одно из современных измельчающих устройств не может сообщить измельченному продукту монодисперсное состояние, и количество слишком крупных и чрезмерно измельченных частиц продукта доходит обычно до 25%. Количество пыли составляет 2% и больше.

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

Для достижения более точного дробления применяют сортирующие устройства, при помощи которых направляют слишком крупные куски обратно в дробильную машину (дробление замкнутым циклом).

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

С некоторым приближением можно рассчитывать часовую производительность молотковой дробилки по следующей эмпирической формуле:

$$Q = \frac{3,6 \cdot \kappa \cdot \rho \cdot D^2 \cdot L \cdot n}{60}, \quad (2.55)$$

где ρ — плотность кг/м³;

D — диаметр ротора, по окружности концов молотков в м;

L — длина ротора в м;

n — число оборотов в минуту;

k — эмпирический безразмерный коэффициент;

$$Q = \frac{3,6 \cdot 0,00085 \cdot 850 \cdot 0,327184 \cdot 0,27 \cdot 300}{60} = 5 \text{ т/ч.} \quad (2.56)$$

Расчет осей молотков

Во время вращения барабана оси нагружены центробежными силами, действующими на молотки [15]:

$$Q_0 = m \omega^2 r, \quad (2.57)$$

где m - масса молотка, кг;

ω - угловая скорость вращения, 1/с;

r - радиус окружностей центров масс молотков, м.

Ось проходит через три диска (рисунок 2.3), которые служат опорами. На нагруженную ось действуют 18 сил Q_0 , т.к. на ней расположены 18 молотков.

Ось рассчитывается как балка на двух опорах (рисунок 2.4). Действие третьей, средней опоры заменяется силой R , которая определяется из условий равенства нулю прогиба в этом сечении. Нагрузка при этом принимается равномерно распределенной:

$$q = \frac{18 Q_0}{l}, \quad (2.58)$$

где Q_0 - сила, действующая на ось, Н;

l - длина балки, м.

Прогиб в центре балки под равномерно распределенной нагрузкой q и моментом M определяется из выражения:

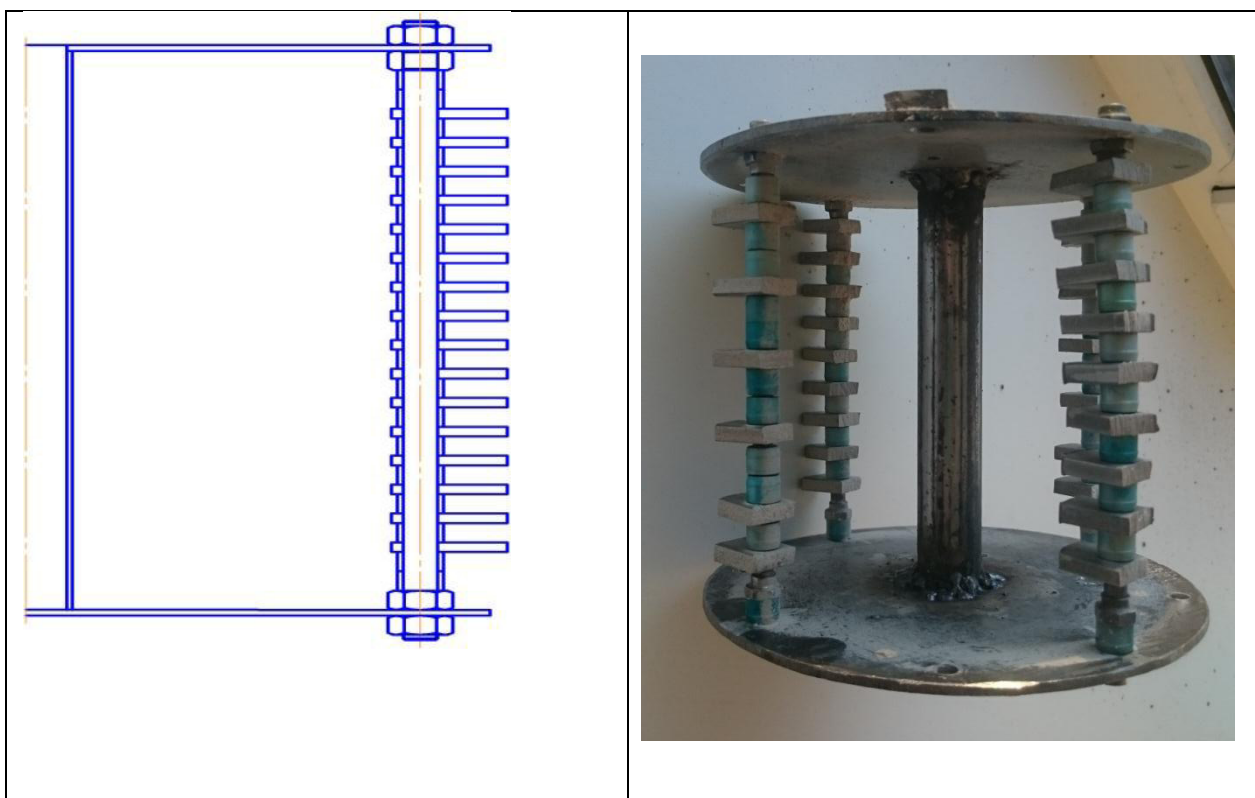


Рисунок 2.3. Схема расположения молотков барабана

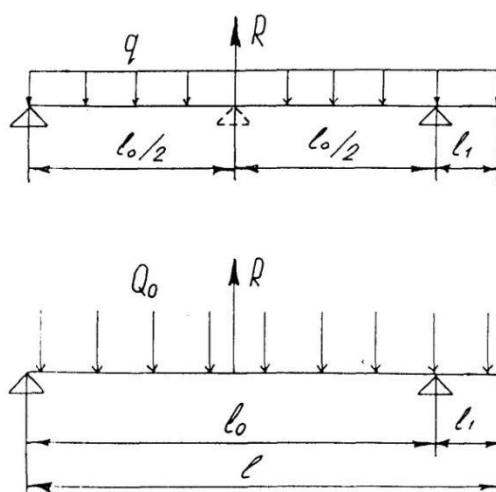


Рисунок 2.4. Расчетная схема оси молотков

$$f_q = \frac{5ql^4}{384EI} - \frac{Ml_0^2}{16EI}, \quad (2.59)$$

где l_0 - расстояние между опорами, м;

q - распределенная нагрузка, Н/м.

Прогиб под действием силы R в этом сечении (нагрузка на консоли заменяется изгибающим моментом M) определяется:

$$f_R = \frac{R l_0^3}{48 EI} \quad (2.60)$$

Отсюда

$$f_q - f_R = \frac{5 q l_0^4}{384 EI} - \frac{M l_0^2}{16 EI} - \frac{R l_0^3}{48 EI} = 0. \quad (2.61)$$

Прогибы и напряжения для балки (рисунок 2.6) определяются как для балки на 2-х опорах, нагруженной рядом сосредоточенных сил.

В результате проведенных расчетов для молотков массой 0,15 кг, при частоте вращения вала 3500 мин⁻¹, максимальной угловой скорости 366,5 с⁻¹, радиусе окружности центров масс молотков 0,2 м был определен диаметр оси молотков d_{oc} равной 20 мм.

Ось молотков рекомендуется изготавливать из стали 40 X с HRC 40...45.

Запас прочности оси по пределу текучести определяется выражением:

$$k_1 = \frac{[\sigma_s]}{\sigma_{sp}}, \quad (2.62)$$

где $[\sigma_s]$ - допустимый предел текучести, МПа;

σ_{sp} - расчетный предел текучести, МПа.

$$k_2 = \frac{[\sigma_B]}{\sigma_{Bp}}, \quad (2.63)$$

где $[\sigma_B]$ - допустимый предел прочности, МПа,

σ_{BP} - расчетный предел прочности, МПа.

Запас прочности по пределу текучести k_1 равен 1,6, по пределу прочности k_2 равен 2,06.

Полученное значение запаса прочности больше нормативного значения минимально-допустимого значения запаса прочности $[h_{доп}] = 1,5...2,0$.

Делаем вывод, что прочность оси обеспечивается.

Диск рассчитывается как плоская деталь с отверстием, нагруженная цилиндрической осью (рисунок 2.5).

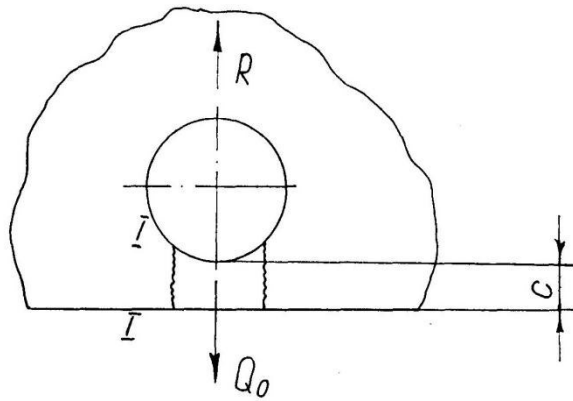


Рисунок 2.5 Схема сил, действующих на диск барабана

Напряжение среза в сечении I - I определяется из выражения:

$$\tau = \frac{R}{2hc}, \quad (2.64)$$

где h - толщина диска в расчетном сечении, м;

c - расстояние от кромки диска до отверстия, м;

R - сила, действующая на диск, Н.

На основании анализа существующих конструкций роторов дробилок выбирает материал для диска ротора сталь 20.

При $h=0,008$ мм, $c=0,028$ м запас прочности равен 4,09, что больше нормативного значения, следовательно обеспечивается надежная работа.

На молоток действует сила Q_0 (рисунок 2.6).

Предел прочности определяется из выражения:

$$\tau = \frac{Q_0}{2c\delta}, \quad (2.65)$$

где Q_0 - действующая на молоток, Н;

δ - толщина молотка, м;

c - расстояние от кромки до отверстия молотка, м.

Предел прочности на срез определяется из выражения:

$$\tau_s = 0,4[\sigma_s], \quad (2.66)$$

где $[\sigma_s]$ - допустимый предел текучести, МПа.

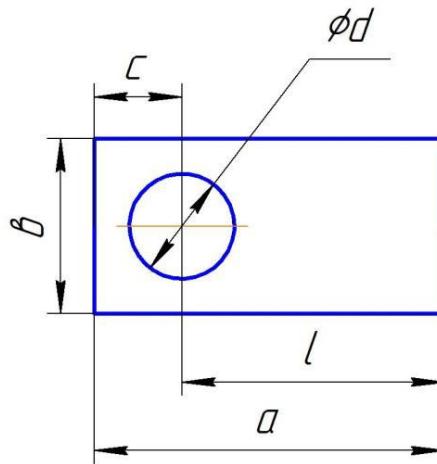


Рисунок 2.6 Расчетная схема молотка дробилки

Исходя из конструктивных особенностей и условий работы выбираем материал молотка сталь 20. При $\delta = 0,04$ м, $c = 0,022$ запас прочности равен 6,7.

Таким образом при работе ротора молотковой дробилки при максимальной угловой скорости $\omega = 366,5 \text{ с}^{-1}$, запас прочности отдельных деталей молоткового барабана обеспечивает надежную их работу. С учетом возможности появления экстремальных условий нагрузки, которые могут возникнуть во время эксплуатации дробилки, принимаем номинальную угловую скорость ротора дробилки равной $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$, что позволит повысить запас прочности.

2.6 Выводы по главе

Выполненные теоретические и инженерные расчеты позволяют определить основные конструктивно-технологические параметры разрабатываемого измельчителя концентрированных кормов и разработать конструктивно-технологическую схему дробилки, а также изготовить конструкцию безрешётной молотковой дробилки кормов.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа экспериментальных исследований

Программа лабораторных и лабораторно-производственных экспериментов составлена с учетом требований изложенных проф. Мельниковым С.В., Тихомировым В.Б. и др. и предусматривала следующие задачи [26,43]:

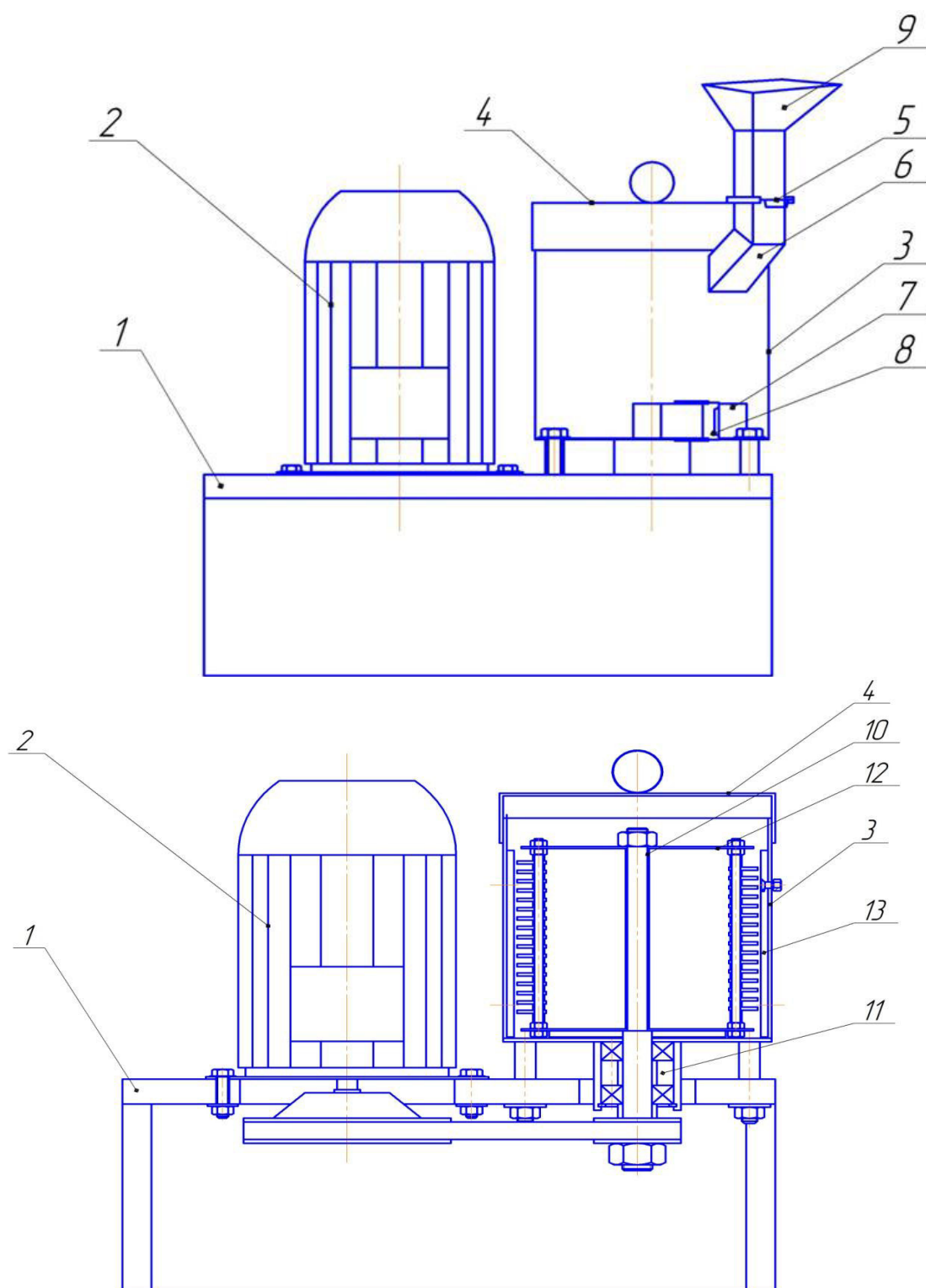
1. Исследование влияния зависимости пропускной способности Q от скорости вращения молотков V ;
2. Исследование влияния удельного расхода энергии Ne от скорости вращения молотков V ;
3. Исследование влияния модуля помола M от скорости вращения молотков V ;
4. Исследование влияния степени измельчения λ (ржи, пшеницы, гороха) от времени нахождения t продукта в рабочей камере.

Полученные данные обрабатывались статистическими методами. Для получения достоверных результатов исследования в экспериментах объем выборки данных определялся по известной методике. С целью снижения случайных ошибок на результаты эксперимента опыты проводились в трёхкратной повторности.

Для проведения исследований была разработана и изготовлена опытная безрешетная молотковая дробилка кормов (рисунки 3.1, 3.2).

Дробилка состоит из рамы, корпуса дробильной камеры (3), вертикального ротора (10), представляющего собой молотковый барабан, установленный на вертикальном валу, который вращается в подшипниковом узле (11). Привод осуществляется от электродвигателя (2) через клиноременную передачу. Имеется приемный бункер (9), загрузочная (6) и выгрузная (7) горловины с регулировочными заслонками (5,8). На внутренней поверхности рабочей камеры установлены сменные бичи (13).

Рабочий процесс осуществляется следующим образом. Исходный материал (зерно) загружается в определенном количестве в приемный бункер (9). При



1 – рама, 2 – электродвигатель, 3 – корпус дробильной камеры, 4 – крышка, 5,8 – заслонки, 6 - загрузная горловина, 7 – выгрузная горловина, 9 – приемный бункер, 10 – вертикальный ротор, 11 – подшипниковый узел, 12 – молотковый барабан, 13 - бичи

Рисунок 3.1 Схемы опытной безрешетной молотковой дробилки



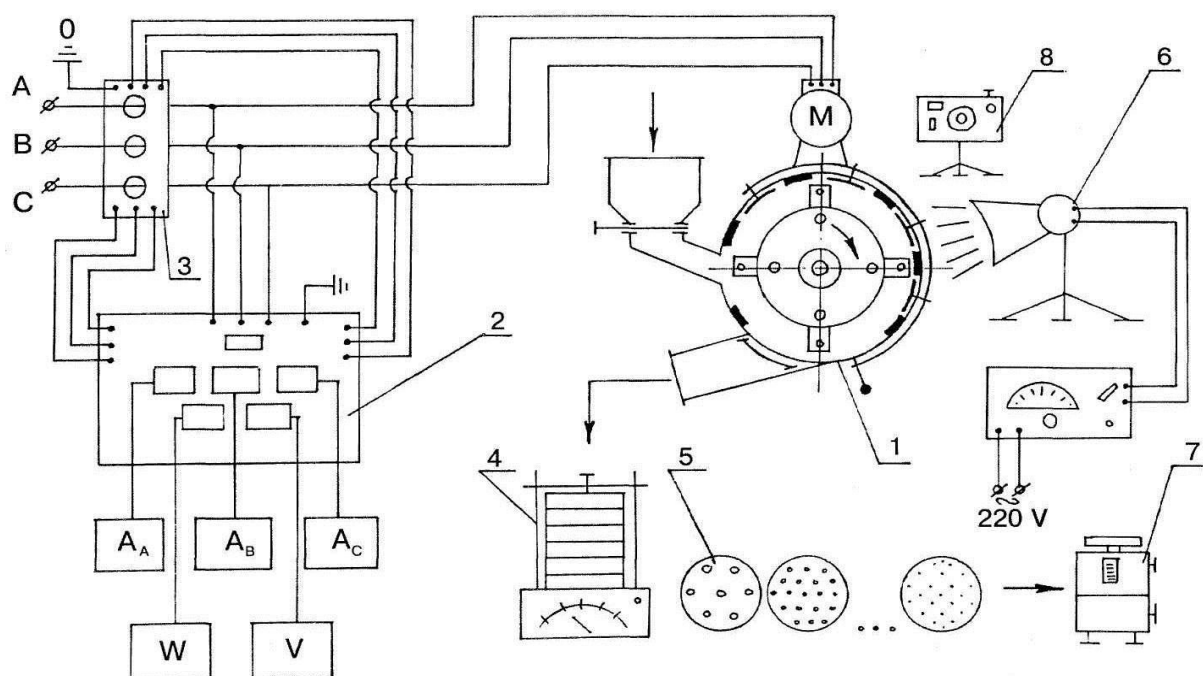
Рисунок 3.2 Общий вид безрешетной молотковой дробилки

открытии заслонки (5) зерно через загрузочную горловину (6) 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 выгрузную горловину (7). Заслонкой (8) регулируется степень открытия выгрузной горловины, т.е. меняется ее пропускная способность. С помощью заслонки (5) изменяется производительность дробилки.

Регулирование степени измельчения осуществляется несколькими способами. Во-первых, изменением времени пребывания материала в рабочей камере дробилки. Это достигается за счет перемещения загрузочной горловины вместе с приемным бункером вверх - вниз по корпусу дробильной камеры. При расположении загрузочной горловины с приемным бункером в крайнем верхнем положении и заслонки на выгрузной горловине в крайнем нижнем положении основная масса измельчаемого материала совершает несколько оборотов в рабочей камере и, следовательно, находится там максимальное время, при этом

степень измельчения будет максимальной. А когда загрузочная горловина с бункером находится в крайнем нижнем положении, а заслонка в крайнем верхнем - основная масса измельчаемого материала совершает один неполный оборот, то есть находится в рабочей камере дробилки минимальное время, и поэтому степень измельчения будет минимальной. Перемещая загрузочную горловину с бункером и заслонку между двумя крайними положениями добиваемся получения различной степени измельчения. Регулирование степени измельчения становится возможным благодаря тому, что высота выгрузного канала, считая от нижней плоскости рабочей камеры, меньше длины молоткового барабана.

Структурная схема экспериментального стенда представлены на рисунках 3.3 и 3.4.



1 – дробилка безрешетная молотковая; 2 – комплект измерительной аппаратуры К-51; 3 – трансформатор тока И-520; 4 – классификатор решетный «Туг-2»; 5 – решетки сменные; 6 – строботометр 2Тст-32-456; 7 – весы технические ВЛТК-500М; 8- фотоаппарат

Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки

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 [14].

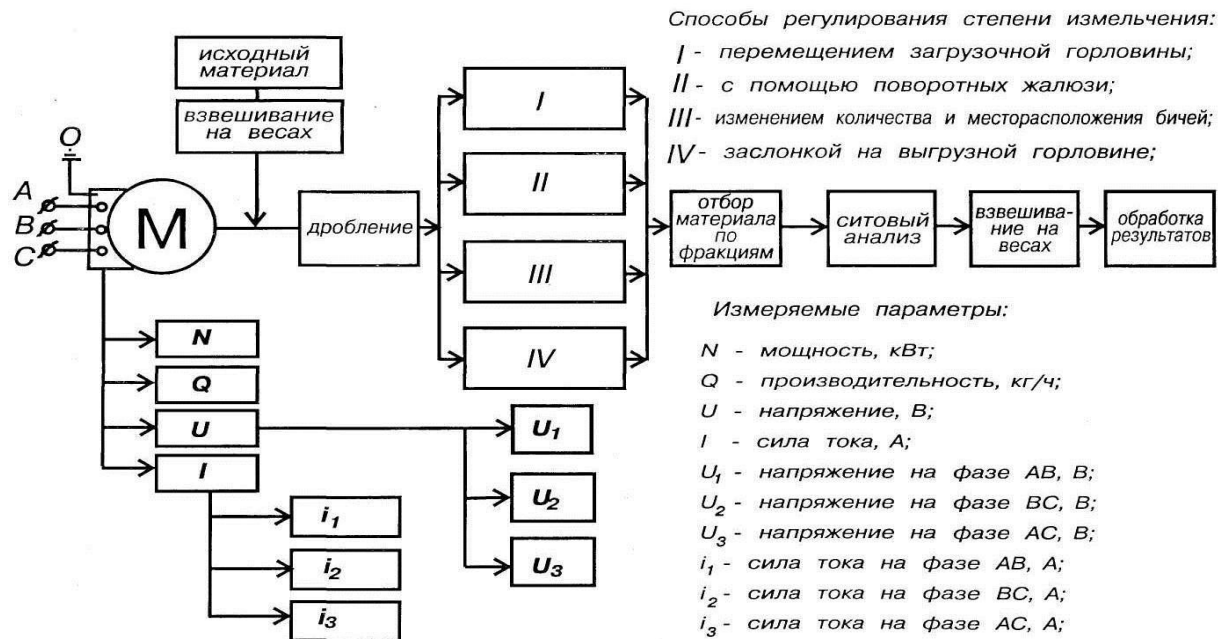


Рисунок 3.4 – Структурная схема экспериментальной установки

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены расположения бичей и выгрузной лопатки в дробильной камере.



Рисунок 3.5 Расположение бичей в безрешетной молотковой дробилке



Рисунок 3.6 Расположение выгрузной лопатки

Конструкция установки позволяет:

- изменять:

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

- измерять:

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

- проводить:

- а) отбор измельченного материала в зависимости от высоты барабана;
- б) ситовый анализ измельченного продукта.

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 8770-58, является средневзвешенный диаметр частиц (модуль), определяемый по формуле [20]:

$$M = \frac{0.5 \cdot G_0 + 1.5 \cdot G_1 + 2.5 \cdot G_2 + 3.5 \cdot G_3}{100}, \quad (3.1)$$

где М – 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:

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

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

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

По данным С.В. Мельникова, для расчета можно принять значение $D_э$ 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 $D_э$.

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 $D_э$ по формуле:

$$D_э = 1.24 \sqrt[3]{V_з}, \quad (3.3)$$

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

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

где ρ – плотность зерна, г/см³

3.2 Методика статистической обработки результатов эксперимента

Основной задачей планирования экспериментальных исследований является разработка математической модели изучаемого процесса в виде уравнения регрессии:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2. \quad (3.5)$$

Оценка значимости коэффициента регрессии проводилась по критерию Стьюдента при выбранном уровне значимости.

Коэффициент регрессии будет значим при выполнении условия:

$$|b_i| / S b_i > t, \quad (3.6)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента.

В противном случае коэффициент регрессии незначим, поэтому соответствующий член можно исключить из уравнения регрессии.

Адекватность уравнения регрессии проверяется с помощью критерия Фишера.

Уравнение регрессии считается адекватным при выполнении условия:

$$F_p \leq F, \quad (3.7)$$

где F – табличное значение критерия Фишера

F_p - расчетное значение критерия Фишера, которое определяется по формуле:

$$F_p = \frac{\max(S_{ag}^2, S_y^2)}{\min(S_{ag}^2, S_y^2)}, \quad (3.8)$$

где S_{ag}^2 - оценка дисперсии адекватности.

Полученное уравнение регрессии после исключения членов с незначимыми коэффициентами приводились к стандартному виду. Обработка данных проводилась с использованием стандартной программы “Statistika 5,0” в среде “Windows - 95”.

На основе расчетных данных построена пространственная фигура с целью определения оптимальных значений угла наклона жалюзи, числа бичей в камере дробилки, место расположения загрузочной горловины.

Полученные экспериментальные данные обрабатывались известными методами математической статистики.

Суммарная погрешность измерений определяется по формуле:

$$\frac{(P)}{P} = \pm \left[\frac{(Q)}{Q} + \frac{(H)}{H} + \frac{(N)}{N} \right], \quad (3.9)$$

где $\frac{(Q)}{Q}$ - погрешность при измерении угла наклона;

$\frac{(H)}{H}$ - погрешность линейных измерений;

$\frac{(N)}{N}$ - погрешность измерений при использовании стробоскоп-метра.

По формуле 3.9. аналогично следует определять погрешности измерения мощности и других параметров.

Для оценки работы безрешетной 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.

$$\text{Эп} = (1000 \cdot \text{Низм}) / Q \cdot \lambda \quad (3.10)$$

где Низм - мощность, затраченная на измельчение материала, кВт;

Q - подача материала в дробилку, кг/ч;

λ - степень измельчения материала;

Эп - энергоемкость, кВт·ч/т.

3.3 Методика обработки экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных проводилась методами общей теории статистики и теории планирования эксперимента [50,62,85] в соответствии с ГОСТ 8.207-76.

Результаты лабораторных экспериментов обрабатывали в соответствии с методами вариационной статистики.

Определялись по всем опытам среднее значение варьирующих величин среднее арифметическое M , среднеквадратичное отклонение σ , дисперсия D и коэффициент вариации CV .

$$M = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.11)$$

где x_i - численное значение измеримой величины;

n - число измерений.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.12)$$

где x_i - значение величины;

$\bar{x}$ - средняя арифметическая величина;

n - размер выборки.

Для установления степени изменения измеряемых величин, характеризующую изменчивость свойств изучаемых объектов, вычисляли коэффициент вариации CV , определяемый по формуле

$$C_v = \frac{\sigma}{M} \cdot 100\% (3.13)$$

Ошибку опыта m вычисляли по формуле

$$m = \frac{c_v}{\sqrt{2 \cdot n}} (3.14)$$

Показатель точности опыта определяли по формуле

$$p = \frac{m}{M} \cdot 100\% (3.15)$$

3.4 Выводы по главе

Используемые известные методы экспериментальных исследований позволяют получить достоверные данные. Размер ошибок и погрешностей не превышают допустимые значения.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Определение пропускной способности безрешетной молотковой дробилки

Отличительной особенностью исследуемой безрешетной молотковой дробилки является работа по открытому циклу измельчения с углом обхвата рабочей камеры до 300° и окружной скоростью молотков до 95 м/с [48,81].

Исследования проводились с целью расширения технологических возможностей и получения возможности регулирования степени измельчения в безрешетных молотковых дробилках.

Известно, что на степень измельчения оказывают влияние различные факторы. В безрешетных молотковых дробилках к ним относятся: зазор между молотками и декой или бичами, профиль дробильной камеры, влажность исходного материала, окружная скорость молотков, время пребывания материала в рабочей камере, месторасположение загрузочной горловины, степень открытия выгрузной горловины, положение поворотных жалюзи и т.д.

Оценка эффективности работы дробилки проводилась по следующим показателям: степень измельчения λ , пропускная способность Q , модуль помола M , удельная энергоемкость Ne .

Основными задачами исследования являлись изучение влияния различных конструктивных и технологических параметров опытной безрешетной молотковой дробилки на качество измельчения, т.е. на модуль помола M , на удельную энергоемкость процесса дробления Ne , на пропускную способность Q .

С целью обоснования внутренней поверхности статора проведен ряд экспериментов со съемными бичами. Количество бичей менялось от 2 до 16, при этом бичи равномерно распределялись по внутренней поверхности дробильной камеры. На основании полученных и обработанных по известной методике данных, были построены зависимости модуля помола M , пропускной способности Q , удельного расхода энергии Ne от числа бичей n в рабочей камере дробилки (рисунок 4.1) и зависимости пропускной способности Q и удельного расхода энергии Ne от модуля помола M (рисунок 4.2).

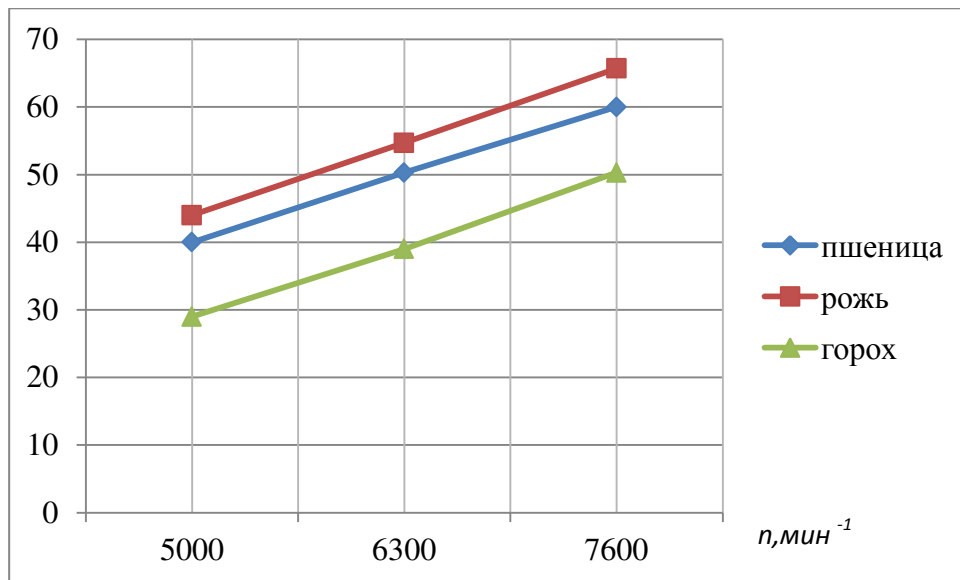


Рисунок 4.1 – Зависимость пропускной способности Q от скорости вращения молотков V

$Ne, \text{кВт}$

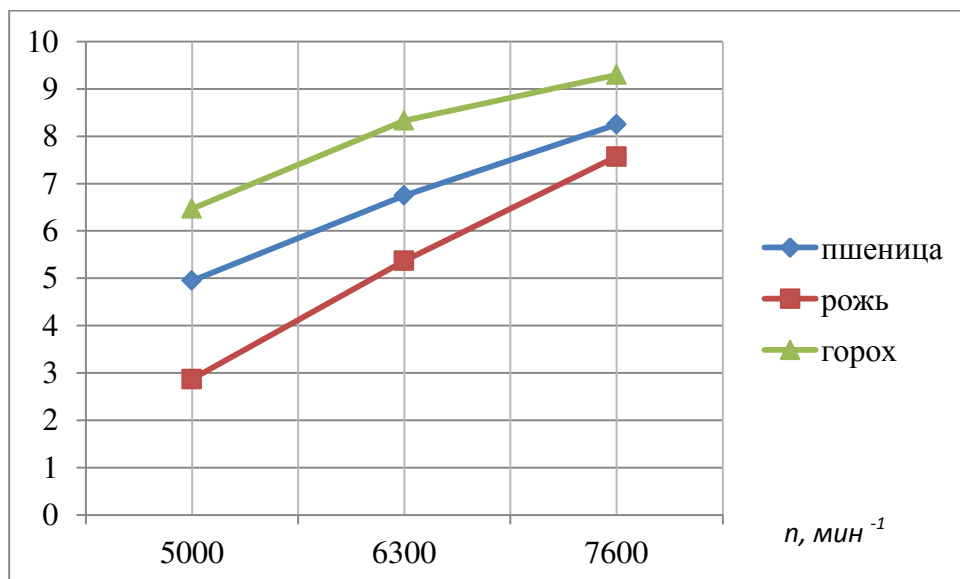


Рисунок 4.2 – Зависимость удельного расхода энергии Ne от скорости вращения молотков V

При анализе полученных данных установлено, что с увеличением числа бичей n в рабочей камере дробилки удельные затраты энергии увеличиваются, а пропускная способность и модуль помола уменьшаются. Начиная с установки пяти бичей и более, модуль помола M стал меньше верхнего предела среднего размола и приблизился к верхнему пределу мелкого размола, что говорит о хорошем качестве помола. Но в этом случае возрастают удельные затраты

энергии. Необходимо найти оптимальное соотношение пропускной способности и удельных затрат энергии при хорошем качестве помола.

Для наглядности рассмотрим перечисленные зависимости на рисунке 4.2. Как видно из графиков, начиная с модуля помола, равного 1,7 мм и менее, резко возрастают удельные затраты энергии, а пропускная способность существенно падает. Следовательно, дальнейшее уменьшение модуля помола нежелательно, так как данный помол удовлетворяет зоотехническим требованиям для кормления как крупного рогатого скота, так и птиц.

Исходя из вышесказанного ясно, что оптимальное число бичей для данной безрешетной дробилки равняется 6. Однако для того, чтобы иметь возможность получать более мелкий помол, который требуется для кормления свиней, согласно зоотехническим требованиям, необходимо ставить на дробилку 8 бичей.

С целью дальнейшего уточнения конструкции дробильной камеры проводился ряд экспериментов с различными наклонами жалюзи. Жалюзи отклонялись от своего вертикального положения как по направлению вращения ротора дробилки, так и против вращения. При этом предполагалось, что частицы измельчаемого материала, имеющие определенную кинетическую энергию, полученную ими после удара молотками, ударяются о наклонную жалюзи и при этом изменяют траекторию своего движения вверх или вниз в зависимости от угла наклона жалюзи.

Предполагалось, что при наклоне жалюзи по направлению вращения ротора измельчаемые частицы должны отклоняться на некоторое расстояние вверх, тем самым увеличивая время своего нахождения в рабочей камере дробилки. В случае, когда жалюзи наклонены противоположно вращению ротора дробилки, время нахождения измельчаемого материала в рабочей камере уменьшается. А, как известно, время нахождения измельчаемого материала в рабочей камере дробилки оказывает существенное влияние на модуль помола или степень измельчения. На основании проведенных экспериментов были получены зависимости модуля помола M , пропускной способности Q , удельного расхода энергии Ne от угла наклона жалюзи θ в рабочей камере дробилки (рисунок 4.3).

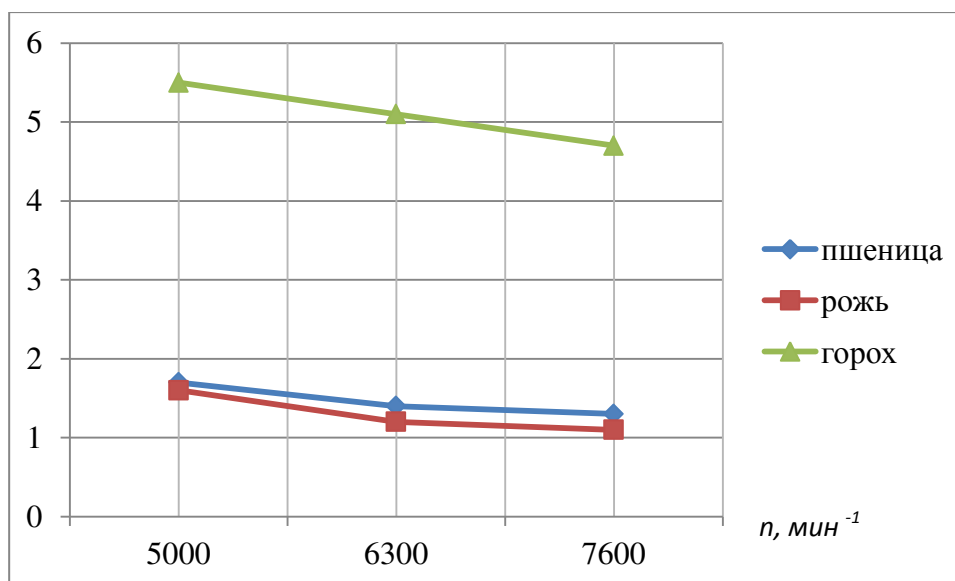
$M, \text{мм}$ 

Рисунок 4.3 - Зависимость модуля помола M от скорости вращения молотков V

Как видно из графиков, при уменьшении модуля помола и пропускной способности идет увеличение удельного расхода энергии. Изменяя положение (наклон) жалюзи, мы можем регулировать модуль помола в пределах от 0,9 до 1,1 мм и выше. При этом измельченный материал по своему качеству соответствует зоотехническим требованиям как для кормления крупного рогатого скота, так и свиней.

На рисунке 4.1 показано влияние количества бичей $n_{\text{в}}$ в рабочей камере дробилки на степень измельчения λ . Как видно из графика, с увеличением числа бичей степень измельчения увеличивается, и достигнув некоторого значения (в данном случае 2,4), процесс замедляется. Дальнейшее увеличение числа бичей в данной конструкции, с точки зрения изменения степени измельчения, не эффективно.

Зависимости степени измельчения гороха ржи и пшеницы от времени нахождения в рабочей камере показаны на рисунках 4.4, 4.5 и 4.6.

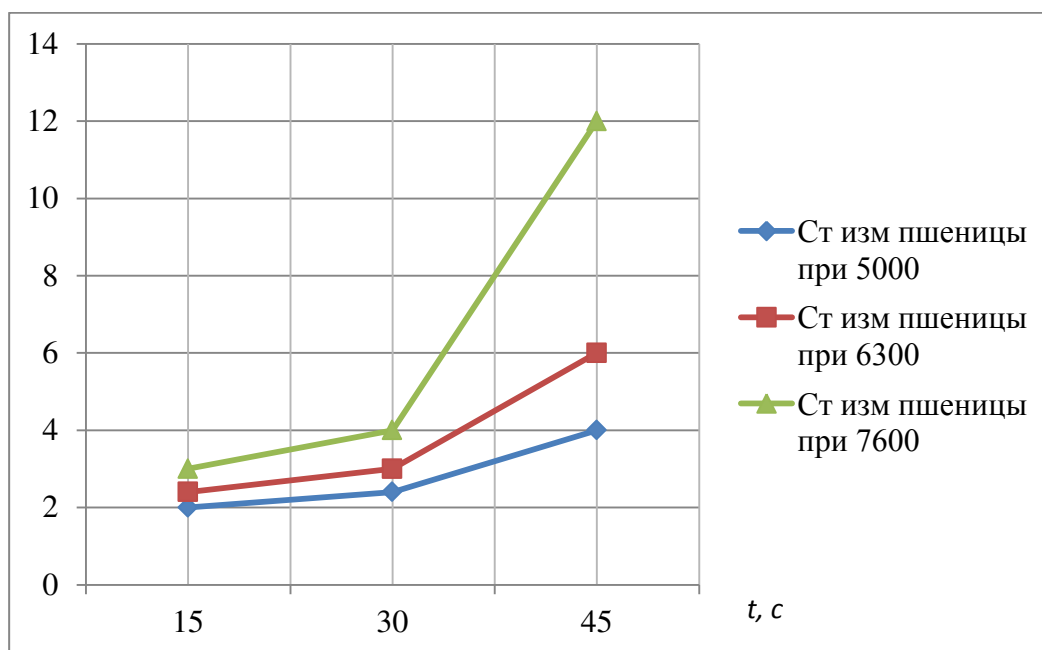
λ 

Рисунок 4.4 - Зависимость степень измельчения λ пшеницы от времени нахождения t продукта в рабочей камере

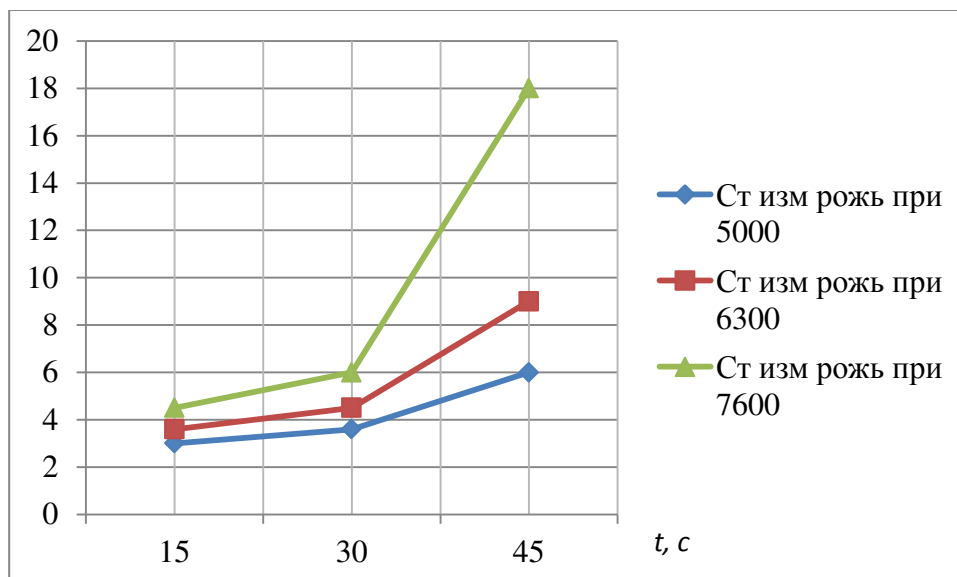
 λ 

Рисунок 4.5 - Зависимость степень измельчения λ ржи от времени нахождения t продукта в рабочей камере

λ

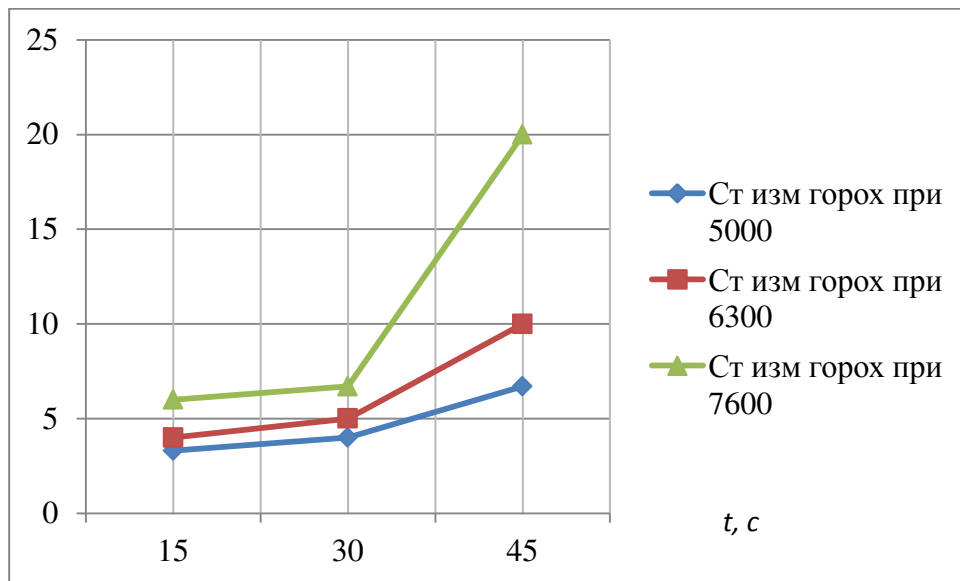


Рисунок 4.6 - Зависимость степень измельчения гороха от времени нахождения продукта в рабочей камере

4.2 Результаты определения модуля помола

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод о том, что предложенная безрешетная молотковая дробилка кормов имеет возможность измельчать широкий спектр кормов различной влажности, в том числе и повышенной (более 17%).

Необходимо отметить, что измельченные корма соответствовали зоотехническим требованиям. Также на этой дробилке измельчались такие материалы, как корень солодки для фармацевтической промышленности, технический казеин, получаемый при переработке молока, и ряд других материалов. На рисунке 4.7 представлены некоторые образцы различных измельченных кормов и материалов.



а)



б)



в)

а) пшеница б) горох в) рожь

Рисунок 4.7 – Измельченные корма

4.3 Выводы по главе

Полученные экспериментальные данные в результате исследования работы молотковой дробилки, а также результаты по определению качества измельченного материала позволяют сделать вывод о том, что разработанная безрешетная молотковая дробилка кормов позволяют получать измельченный продукт, соответствующий зоотехническим требованиям.

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1 Расчет технико-экономических показателей новых технических средств приготовления кормов

Расчет технико-экономических показателей произведен по общей известной методике [28,94]. При определении годового экономического эффекта необходимо обеспечить сопоставимость сравниваемых объектов по таким параметрам, как годовой объем выполняемых работ, качество выполненной работы, производительность машин, затраты энергии, условия труда и влияние на окружающую среду и др.

Технико-экономические показатели безрешетной молотковой дробилки сравнивались с показателями КДУ-2. Необходимые исходные данные для расчета представлены в таблице 5.1.

Балансовую стоимость выбираем одинаковой для обеих конструкций, так как не представляется возможным на сегодняшний день определить стоимость машин из-за меняющейся отпускной цены и инфляционных процессов в экономике.

Таблица 5.1 - Исходные данные для расчета технико-экономических показателей безрешетной дробилки

Показатели	Единица измерения	Предлагаемая дробилка	КДУ-2
<i>Объем годовых работ</i>	т	8400	8400
Пропускная способность	т/ч	6,0	2,0
Масса конструкции	кг	470	1200
Установленная мощность	кВт	30	30
Количество обслуживающего персонала	чел	1	1
- разряд работы; - норма амортизации;	%	V 16,6	V 16,6
Годовая загрузка	ч	700	2100
Занимаемая площадь	м ²	1,44	1,44

Для создания одинаковых производственных условий объемы годовых работ принимаем для существующей и разрабатываемой конструкции равными.

Годовой экономический эффект от использования разрабатываемой дробилки определяют по экономии приведенных затрат [110]:

$$\mathcal{E} = [(C_{\bar{o}} + E_n K_{\bar{o}}) - (C_n + E_n K_n)] A_n, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}$ – годовой экономический эффект, руб.;

$C_{\bar{o}}, C_n$ – себестоимость единицы работы по базовому и новому вариантам, руб.;

$K_{\bar{o}}, K_n$ – удельные капитальные вложения в базовом и новом варианте, руб.;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15;

A_n – объем выполняемых работ в натуральных единицах.

Аналогично определенные расчетные технико-экономические показатели сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 - Техничко-экономические показатели безрешетной дробилки

Показатели	Единица измерения	Существующая дробилка	Предлагаемая дробилка
Себестоимость продукта	%	100	29,6
Металлоемкость	кг/т	0,029	0,011
Энергоемкость	кВт ч/т	15	5
Фондоемкость	%	100	100
Удельные капитальные вложения	%	100	100
Приведенные затраты	%	100	30,8
Срок окупаемости	год	-	0,25

Анализ данных таблицы 5.2 показывает, что при использовании предлагаемой дробилки снижается металлоемкость процесса, а также себестоимость и энергоемкость, что подтверждает преимущество использования безрешетных молотковых дробилок.

Определение степени снижения показателей затрат:

$$C_t = \frac{t_{\bar{o}} - t_n}{t_{\bar{o}}} \cdot 100, \quad (5.2)$$

где $t_{\bar{o}}, t_n$ – показатели базовой и новой разрабатываемой конструкции.

Годовая экономия затрат труда:

$$\mathcal{E}_z = (t_{\bar{o}} - t_n) \cdot Q_n, \quad (5.3)$$

где Q_n –годовой объем работ.

5.2 Расчет энергетических показателей

Одним из показателей эффективности работы сельскохозяйственных машин и оборудования является показатель энергетической эффективности. Сегодня, когда в стране развиты инфляционные процессы, наступает энергетический кризис, идет резкое возрастание цен на энергосистемы всех видов. Актуальной задачей становится проведение не только общепринятого экономического анализа, но и энергетического анализа разрабатываемых технологий и технических средств. Сегодня известны методики расчета

энергетических показателей эффективности различных технологических процессов и технических средств в сельскохозяйственном производстве [49,76,105].

Энергетический анализ позволяет оценивать как существующие, так и вновь разрабатываемые технологии и средства механизации. При этом за основной критерий энергетической оценки принимают показатель энергетической эффективности R , который определяется по формуле [51,74]:

$$R = \frac{\Pi}{E}, \quad (5.4)$$

где Π - энергия, содержащаяся в конечном сельскохозяйственном продукте, МДж;

E - энергия, затраченная на производство сельскохозяйственного продукта, МДж.

Энергетическая эффективность технологии производства сельскохозяйственной продукции можно определить так же по формуле:

$$R = \frac{\alpha_{\Pi} \cdot H_i}{E}, \quad (5.5)$$

где α_{Π} - энергетический эквивалент основной продукции, МДж/т;

H_i - выход основной продукции, т/га.

Полные затраты энергии на производство продукции животноводства определяется как совокупность прямых и овеществленных затрат энергии, отнесенных к единице продукции:

$$\mathcal{E}_{\Pi} = \sum_j \mathcal{E}_{npj} + \sum \mathcal{E}_{oj}, \quad (5.6)$$

где $\mathcal{E}_{\Pi}$ - полные затраты на производство продукции животноводства, МДж/т;

$\mathcal{E}_{npj}$ - прямые удельные затраты энергии по j – технологическому процессу, МДж/т;

$\mathcal{E}_{oj}$ - затраты, овеществленные при производстве энергоносителей и других ресурсов (энергетических средств, рабочих машин, технологического оборудования с учетом расходов на техническое обслуживание и ремонт; кормов,

сырья, эксплуатационных материалов и т.д.; производственных зданий и сооружений; хранилищ, складов и т.д.), приходящихся на j – процесс, МДж/т.

Прямые удельные затраты энергии определяются по формуле:

$$\mathcal{E}_{npj} = \frac{1}{\Pi} \sum_k H_{kj} \cdot e_k, \quad (5.7)$$

где H_{kj} - расход энергоносителя k – вида, кВт.ч/год, кг.у.т./год, кг/год;

Π - годовой выход продукции, т;

e_k - энергосодержание k – энергоносителя (электроэнергии – МДж/кВт.ч, автотракторного топлива и смазочных масел – МДж/кг, всех видов котельно-печного топлива – МДж/кг.у.т., тепловой энергии – МДж/Мкал и т.д.).

Овещественные удельные затраты энергии определяются для энергоносителей по формуле:

$$\mathcal{E}_{oj} = \frac{1}{\Pi} \sum_k H_{kj} \cdot \alpha_k, \quad (5.8)$$

где α_k - энергетический эквивалент k - энергоносителя, то есть коэффициент, учитывающий дополнительный расход энергии на его добычу, производство и транспортировку (электроэнергии – МДж/кВт.ч, автотракторного топлива и смазочных масел – МДж/кг, всех видов котельно-печного топлива – МДж/кг.у.т, тепловой энергии – МДж/Мкал и т.д.).

Для определения энергоемкости средств механизации используют следующие зависимости:

$$\mathcal{E}_{obj} = \frac{Q_{nj}}{10^{-2} W_j \Pi} \sum_l \frac{\alpha_l M_l (\alpha_l + R_l)}{T_{nl}}, \quad (5.9)$$

$$\mathcal{E}_{Mj}^{mp} = \frac{\alpha_l M_l (\alpha_l + R_l) Q_j}{10^{-2} W_j \Pi T_{nl}}, \quad (5.10)$$

$$\mathcal{E}_{Mj}^{авт} = \frac{L_j H_{pj}}{10^{-5} Q_j \beta_j} \sum_l \alpha_l M_l (\alpha'_l + R'_l), \quad (5.11)$$

где Q_{nj} - масса перерабатываемого сырья, т/год;

W_j - производительность оборудования, т/ч;

α_l - энергетический эквивалент машины l – типа, входящий в оборудование

j – процесса, МДж/кг;

M_l - масса l – машины, кг;

a_l – годовые нормативные отчисления на реновацию и ремонт по типам машин, %;

T_{nl} - годовая нормативная загрузка l – машины, ч;

Q_j - годовая масса перевозимого материала, т;

L_j - плечо перевозки сырья, материалов, животных и т.д.;

H_{pj} - удельный расход груза на единицу продукции, т/т;

α'_l, R'_l - годовые отчисления на реновацию и ремонт l – машины, входящей в состав автопоезда (автомобиля и прицепов), на 1000 км пробега, %;

β_j - коэффициент использования пробега.

Энергоемкость различных сооружений и зданий определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_{3j} = \frac{1}{10^2 \Pi} \sum_n \alpha_n a_n F_{nj}, \quad (5.12)$$

где α_n - энергетический эквивалент здания n – типа, МДж/м²;

a_n - годовые амортизационные отчисления, %;

F_{nj} - площадь здания, м².

Энергоемкость кормоцехов, складов, хранилищ определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_{3j} = \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_3 F_3 a_3 G_{mn}}{100 T_{3n} W_{cm}} + \frac{\alpha_{ck} F_{ck} a_{ck} G_{xn}}{100 Q_{ck}}, \quad (5.13)$$

где $\mathcal{E}_{3j}$ – энергоемкость кормоцехов и складов, МДж/м²;

α_3 - энергетический эквивалент зданий производственных помещений, МДж/м²;

F_3 - площадь производственного помещения, м²;

a_3 - амортизационные отчисления за год, %;

G_{mn} - количество переработанного продукта за год, т;

T_{3n} - период использования помещения при работающем оборудовании в году, ч;

W_{cm} - производительность оборудования по переработке продукта за час сменного времени, т/ч;

α_{cm} - энергетический эквивалент склада, траншеи, МДж/м²;

F_{ck} - площадь склада, траншеи, м²;

a_{ck} - амортизационные отчисления, %;

$Q_{ск}$ - вместимость склада, траншеи, т;

$G_{хп}$ - количество хранимого материала, т.

Овещественные в кормах затраты энергии определяют исходя из следующей зависимости:

$$\mathcal{E}_{kj} = \frac{1}{\Pi} \sum_m H_{mj} (e_m + \alpha_m) . \quad (5.14)$$

Аналогично определяют затраты овещественные в подстилках, переносимые ветпрепаратами и т.д.

Энергосодержание получаемой продукции рассчитывается по каждому виду и затем суммируется. Например, энергосодержание продукции КРС при производстве молока определяется из следующих составляющих:

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 , \quad (5.15)$$

где Q_{1-6} - энергосодержание молока, живой массы выбракованных животных, приплода, прироста выращиваемых животных, экскрементов, подстилки.

Энергосодержание молока определяется:

$$Q_1 = B_k m e_m , \quad (5.16)$$

где B_k - среднегодовое поголовье коров на ферме, гол.;

m - средняя продуктивность коровы – удой на корову, кг/год;

e_m - энергосодержание 1 кг молока жирностью 3,8%, МДж/кг.

Аналогично определяются и энергосбережение остальных видов продукции.

При этом необходимо помнить, что энергосодержание кормов рассчитывается с учетом их перехода в продукты животноводства. В этом случае животные выступают в роли биотрансформаторов энергии корма в энергию продукта [112,123].

При проведении энергетического анализа разработанных новых технических средств исходили из того, что сравниваемые машины и оборудование находились в одинаковых производственных условиях. Исходя из вышеизложенного для выявления эффективности энергозатрат достаточно провести энергетический анализ конструкций машин, так как все условия работы (объем, технологические схемы приготовления кормов, виды кормов и т.д.) были одинаковыми для всех сравниваемых машин.

Оценка энергетической эффективности разработанных машин проводилась по вышеприведенной методике.

Для оценки энергетической эффективности разработанной безрешетной молотковой дробилки в качестве базовой машины была принята дробилка КДУ-2 [79]. При этом энергозатраты на изготовление конструкций обеих машин принимались равными, так как конструкции отличаются незначительно.

Оценка эффективности проводилась по коэффициенту энергетических затрат:

$$K_{\text{э}} = \frac{\text{Э}_{\text{сн}}}{\text{Э}_{\text{об}}}, \quad (5.17)$$

где $\text{Э}_{\text{сн}}$ – совокупные затраты технологического процесса новой машины, МДж/т;

$\text{Э}_{\text{об}}$ – совокупные затраты технологического процесса базовой машины, МДж/т.

Данные для расчета энергетической эффективности приведены в таблице 6.1.

Совокупные затраты на технологический процесс определяются:

$$\text{Э}_{\text{с}} = \text{Э}_{\text{н}} + \text{Э}_{\text{оз}} + \frac{\text{Э}_{\text{ж}} + \text{Э}_{\text{об}} + \text{Э}_{\text{пом}}}{Q}, \quad (5.18)$$

где $\text{Э}_{\text{н}}$ – прямые затраты энергии, МДж/т;

$\text{Э}_{\text{оз}}$ – овеществленные затраты энергии, МДж/т;

$\text{Э}_{\text{ж}}$ – энергозатраты живого труда, МДж/ч;

$\text{Э}_{\text{об}}$ – энергоемкость оборудования, МДж/ч;

$\text{Э}_{\text{пом}}$ – энергоемкость производственных помещений, МДж/ч.

Прямые затраты энергии определяют по формуле:

$$\text{Э}_{\text{н}} = P_{\text{э}} K_{\text{э}}, \quad (5.19)$$

где $P_{\text{э}}$ – расход электроэнергии, кВт-ч/т;

$K_{\text{э}}$ – коэффициент перевода 1 кВт-ч в Мдж, $K_{\text{э}} = 3,6$.

При отсутствии норм расход электроэнергии рассчитывается

$$P_{\text{э}} = \frac{\sum N}{Q}, \quad (5.20)$$

где $\sum N$ – потребляемая мощность, кВт.

Прямые затраты для базового варианта составляют:

$$\mathcal{E}_{пб} = \frac{30}{2,0} \cdot 3,6 = 54 \text{ МДж/т};$$

для безрешетной дробилки:

$$\mathcal{E}_{пн} = \frac{30}{6} \cdot 3,6 = 18 \text{ МДж/т};$$

Овеществленные затраты энергии определяются:

$$\mathcal{E}_{оэ} = P_{э} K_{э\kappa\beta} = \frac{\sum N}{Q} K_{э\kappa\beta}, \quad (5.21)$$

где $K_{э\kappa\beta}$ – энергетический эквивалент электроэнергии,

$K_{э\kappa\beta} = 8,7 \text{ МДж/кВт-ч};$

$$\mathcal{E}_{оэб} = \frac{30}{2,0} \cdot 8,7 = 130,5 \text{ МДж/т};$$

$$\mathcal{E}_{оэн} = \frac{30}{6,0} \cdot 8,7 = 43,5 \text{ МДж/т};$$

Энергозатраты живого труда определяются:

$$\mathcal{E}_{жс} = n \alpha_{жс}, \quad (5.22)$$

где n – количество обслуживающего персонала, чел;

$\alpha_{жс}$ – энергетический эквивалент затрат живого труда,

$\alpha = 0,9 \text{ МДж/чел-ч}.$

Для базовой и новой машины имеем:

$$\mathcal{E}_{жс} = 1 \cdot 0,9 = 0,9 \text{ МДж/ч}.$$

Энергоемкость, приходящаяся на 1 час работы оборудования, определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{об} = \frac{E_{об}}{T_z}, \quad (5.23)$$

где T_z – годовая загрузка машины, ч;

$E_{об}$ – общая энергоемкость оборудования, МДж.

$$E_{об} = \alpha_{об} M,$$

где $\alpha_{об}$ – энергетический эквивалент оборудования, $\alpha_{об} = 104 \text{ МДж/кг};$

M – масса оборудования, кг.

Энергоемкость, приходящаяся на 1 час работы оборудования:

$$\mathcal{E}_{обб} = \frac{104 \cdot 1200}{4200} = 29,70 \text{ МДж/ч};$$

$$\mathcal{E}_{обб} = \frac{104 \cdot 470}{1400} = 34,9 \text{ МДж/ч}.$$

Энергоемкость производственных помещений определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{пом} = \frac{\alpha_{пом} S_{пол}}{1000 T_z}, \quad (5.24)$$

где $\alpha_{пом}$ – энергетический эквивалент помещения, $\alpha_{пом} = 5025 \text{ МДж/м}^2$;
 $S_{пол}$ – площадь, занимаемая оборудованием, м^2 .

Энергоемкость производственных площадей соответственно составляет:

$$\mathcal{E}_{помб} = \frac{5025 \cdot 1,44}{100 \cdot 4200} = 0,017 \text{ МДж/ч};$$

$$\mathcal{E}_{помн} = \frac{5025 \cdot 1,44}{100 \cdot 1400} = 0,051 \text{ МДж/ч}.$$

Совокупные затраты составляют:

$$\mathcal{E}_{сб} = 54 + 130,5 + \frac{0,9 + 29,7 + 0,017}{2,0} = 199,8 \text{ МДж/т};$$

$$\mathcal{E}_{сн} = 18 + 43,5 + \frac{0,9 + 34,9 + 0,051}{6,0} = 67,475 \text{ МДж/т}.$$

Коэффициент энергетических затрат:

$$K_z = \frac{67,475}{199,8} = 0,33.$$

Новая безрешетная дробилка имеет совокупные затраты энергии на 67% меньше, чем базовая машина КДУ-2. Объясняется это тем, что новая машина имеет большую пропускную способность и меньшую массу конструкции.

Оценку эффективности измельчителя проводим в сравнении с базовой машиной ИКМ-Ф-10. Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.3. Расчет произведен по вышеуказанной методике, сравнительные показатели приведены в таблице 5.6. энергозатраты на изготовление машин и занимаемая ими площадь приняты равными, так как значения отличаются незначительно.

Таблица 5.6 – Энергетическая оценка измельчителя

Показатели	Цифровые значение	
	ИКФ-М-10	Предлагаемая конструкция
Прямые затраты энергии, МДж/т	5,15	3,6
Овеществленные затраты энергии, МДж/т	12,44	8,7
Энергозатраты живого труда, МДж/ч	0,9	0,9
Энергоемкость оборудования, МДж/ч	115,0	52,6
Энергоемкость помещения, МДж/ч	0,088	0,088
Совокупные затраты, МДж/т	29,19	23,02
Коэффициент энергетических затрат	-	0,79

Рассчитанные по вышеприведенной методике сравнительные энергетические показатели для универсального измельчителя по сравнению с измельчителем ИРМ-50, исходные данные, а также данные сравниваемых аналогов приведены соответственно в таблице 5.7

Таблица 5.7 Техничко-экономические показатели и энергетическая оценка измельчителя

Показатели	Цифровые значение	
	ИРМ-50	Предлагаемая конструкция
Масса, кг	2950	950
Потребная мощность, кВт	90	60
Количество обслуживающего персонала, чел.	1	1
Разряд работ	IV	IV
Норма амортизации, %	16,6	16,6
Годовая загрузка, ч	1000	1000
Производительность, т/ч	12...15	5...6
Занимаемая площадь	2,25	2,25
Прямые затраты энергии, МДж/т	32,4	30,8
Овеществленные затраты энергии, МДж/т	78,3	74,5

Энергозатраты живого труда, МДж/ч	0,9	0,9
Энергоемкость оборудования, МДж/ч	306,8	98,8
Энергоемкость помещения, МДж/ч	0,113	0,113
Совокупные затраты, МДж/т	141,48	119,56
Коэффициент энергетических затрат	-	0,85

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы, что разработанная безрешетная молотковая дробилка, может применяться как в технологических линиях кормоцехов, так и как отдельная машина.

Проведенная технико-экономическая и энергетическая оценка разработанных технических средств позволила получить годовой экономический эффект от внедрения только безрешетной молотковой дробилки в размере 10,6 тыс. руб. (в ценах 2019 года). При этом коэффициент энергетических затрат для безрешетных молотковых дробилок составляет 0,33.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа существующих отечественных и зарубежных конструкций дробилок кормов обоснована технологическая схема безрешетной молотковой дробилки, которая состоит из корпуса дробильной камеры, заслонки, загрузочной и выгрузочной горловин, приемного бункера, вертикального ротора, подшипникового узла, молоткового барабана, бичей.

2. Получены математические модели процесса изменения степени измельчения в зависимости от числа частиц и с учетом ее предельно достижимого значения (27), (28). Разработаны общие уравнения кинетики процесса дробления (20), (21) на основании которых получены методы анализа влияния различных факторов на эффективность рабочего процесса безрешетной молотковой дробилки вертикального типа.

3. Выполнены лабораторные исследования для подтверждения достоверности теоретических предпосылок. В результате чего получено подтверждение адекватности математических моделей измельчения кормов в дробилке. Численные значения коэффициентов i , β находятся в интервале: $i(0,06...1,33)$, $\beta(-0,43...-0,23)$, для выражения (20). Теоретические предпосылки нашли полное подтверждение в экспериментальных исследованиях.

4. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенных решений и их оптимальные значения: высота расположения загрузочной горловины 0,2 м, количество выгрузных горловин – 3, количество жалюзи – 3 в ряду при 4-х концентрично-расположенных рядах, частота вращения ротора режущего аппарата 330 мин⁻¹, диаметр рабочей камеры 630 мм.

5. Годовой экономический эффект от внедрения только безрешетной молотковой дробилки составляет 10,6 тыс. руб. (в ценах 2019 года). Коэффициент энергетических затрат для безрешетных молотковых дробилок составляет 0,33.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1071308 В 02 с 13/04. Молотковая дробилка /А.Б.Демский, С.Д.Черныш и др. (СССР). - №3358579/ 29-33; Заявлено 02.12.84; Оpubл.07.02.84; Бюл. № 5.
2. А.с. 152608 СССР В02 d; 50 с, 8₃₀ . Молотковая дробилка /В.И.Сыроватка, Н.Н.Фадеев (СССР). - № 748535/30-15; Заявлено 18.10.61, Оpubл. 1963; Бюл. № 1.
3. А.с. 152608 СССР В02 d; 50 с, 8₃₀ . Молотковая дробилка /В.И.Сыроватка, Н.Н.Фадеев (СССР). - № 748535/30-15; Заявлено 18.10.61, Оpubл. 1963; Бюл. № 1.
4. А.с. 1634171 СССР. МКИ³ А01F 29/00. Измельчитель кормов /И.Е.Волков, В.С.Комиссаров. Оpubл. в Б.И. № 39, 1991.
5. А.с. 173521 СССР Кл. 45е, 35²⁴, МПК А 01 f. Молотковая дробилка /В.И.Сыроватка (СССР). - № 747237/30-15; Заявлено 30.09.61; Оpubл. 14.09.65; Бюл. № 15.
6. А.с. 173521 СССР Кл. 45е, 35²⁴, МПК А 01 f. Молотковая дробилка /В.И.Сыроватка (СССР). - № 747237/30-15; Заявлено 30.09.61; Оpubл. 14.09.65; Бюл. № 15.
7. А.с. 321283 СССР МПК В02 с 13/09. Молотковая дробилка /В.П.Файнер, Н.П.Брынза (СССР). - № 1439543/28-13; Заявлено 08.05.70; Оpubл. 17.01.72; Бюл. № 35
8. А.с. 410810 СССР М. Кл. В02 с 13/18. Молотковая дробилка /В.В.Гайдидей, В.Я.Кравченко (СССР). - № 1707675/29-33; Заявлено 22.10.71; Оpubл. 15.01.74; Бюл. № 2.
9. А.с. 622454 СССР М. Кл² А01 К 5/00. Дробилка для кормов /А.С.Клебан, В.Г.Мальков, Н.А.Токарчук (СССР). - №2408977/ 30-15; Заявлено 05.10.76; Оpubл.17.07.78.
- 10.А.с. 837396 В02 С 2/04. Конусная дробилка /А.Б.Сыса, Г.В.Молозина. (СССР). Оpubл. 18.06.81; Бюл. № 22.
- 11.А.с. 876153 В02 С 13/02. Ротор молотковой дробилки /В.А.Стрельцов (СССР). Оpubл. 30.10.81; Бюл. № 40.
- 12.А.с. 948429 М.Кл³. В02 с 13/16. Молотковая дробилка /Ц.Д.Сампилов,

- В.А.Маркусеев и др. (СССР). - № 3216704/29-33; Заявлено 10.01.80: Оpubл. 07.08.82; Бюл. № 29.
- 13.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.
 - 14.Алешкин В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: Автор. дис. д-ра техн. наук. - Санкт-Петербург - Пушкин., 1995. - 38 с.
 - 15.Алешкин В.Р., Рошин П.М. Механизация животноводства. - М.: Агропромиздат, 1985. - 336 с.
 - 16.Архипов С.М., Волков И.Е., Зиганшин Б.Г. Некоторые особенности моделирования рабочего процесса безрештной молотковой дробилки// Механизация технологических процессов в растениеводстве и животноводстве: Сб.науч.тр. Казанской ГСХА. - Казань, 1996.- С.8-10.
 - 17.Бремер Г.И. Теория и расчет дробильных машин. Учебное пособие. Изд. ВСХИЗО, 1970. - 50 с.
 - 18.Галкин А.Ф. Комплексная механизация производственных процессов в животноводстве. 2-е перераб. и допол. изд. - М.: Колос, 1974.- 368 с.
 - 19.Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие. - М.: Издательство литературы по строительству, 1964. - 111 с.
 - 20.Глебов Л.А. Повышение эффективности измельчения компонентов комбикормов. - М.: ЦНИИТЭИ Минзата СССР, 1984.
 - 21.ГОСТ 8.432-81 Влажность зерна и продуктов его переработки. Методика выполнения измерений на образцовой вакуумно-тепловой установке. - М.: Изд-во стандартов, 1981. - 7 с.
 - 22.Дробилка безрешетная молотковая / Волков И.Е., Зиганшин Б.Г. // Информ.листок Татарского ЦНТИ - 1996, № 110 - 96.
 - 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. 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
 25. Зиганшин Б.Г. Технологии и технические средства приготовления кормов / Б.Г. Зиганшин. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2003. – 188с.
 26. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. - Л.: Колос, 1978. - 560 с.
 27. Мельников С.В. Моделирование рабочего процесса в молотковой кормодробилке // Механизация сельскохозяйственного производства: - Зап. Ленинградского СХИ.- Л., 1968. - т.119 -Вып.1.- С.113 - 117.
 28. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. - Л.: Колос, 1978.-168 с.
 29. 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.
 30. Мельников С.В., Плохов Ф.Г. Определение скорости удара при разрушении зерна. - Труды, ЧИМЭСХ, 1966, Вып. 21. - С.113-117.
 31. Мельников, С.В. Теоретические основы технологии измельчения корма на молотковых дробилках // Земледельческая механика: Сб. тр. - М: Машиностроение, 1965. - Т.4. - С. 139 - 152.
 32. Мельников, С.В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками: Автореф. дис...д-ра техн. наук. – Л., 1969. – 60 с.
 33. Мерчалов, СВ. Повышение эффективности работы молотковой дробилки: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Воронеж, 1998. — 23 с.
 34. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Рекомендации НТС МСХ СССР.-М.: 1979. - 79 с.

- 35.Методика проведения испытания машин для измельчения кормов. - М.: ВНИИЭСХ, 1969.- 80 с.
- 36.Методика статистической обработки эмперических данных. - М.: - 1963. - 12 с.
- 37.Методика энергетического анализа технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. - М.: ВИМ, 1995. - 96 с.
- 38.Методические указания по применению математических методов планирования эксперимента в сельском хозяйстве. - М.: Колос, 1973.- 40 с.
- 39.Механизация животноводства на промышленной основе. В.В. Куянов, А.К. Мельник и др. - М.: Колос, 1972. - 432 с.
- 40.Механизация производственных процессов на животноводческих фермах. / Под ред. В.С. Краснова. Изд. 5-ое.- М.: Сельхозиздат, 1963. - 479 с.
- 41.Микрюков, К.Ю. Совершенствование процесса и устройств измельчения зерна путем оптимизации воздушно-дисперсных потоков: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Киров, 2003. – 19 с.
- 42.Мянд, А.Э. Кормоприготовительные машины и агрегаты. - М.: Машиностроение, 1970. - С. 105-231.
- 43.Налимов, В.В. Логические основания планирования эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голикова - М.: Металлургия, 1980.- 152 с.
- 44.Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова - М.: Наука, 1965. - 340 с.
- 45.Налимов, В.В. Теория эксперимента. - М.: Наука, 1971.- 207 с.
- 46.Некрашевич, В.Ф. Научно-техническое обоснование технологии и средств механизации приготовления кормовых гранул и брикетов с заданными физико-механическими свойствами: Автореф. дис...д-ра техн. наук. – Л. - Пушкин, 1983. – 40 с.
- 47.Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф Л. Энергоатомиздат. Ленинградское отд. 1991г.
- 48.Нормы амортизационных отчислений на тракторы, сельскохозяйственные машины и оборудование, используемое в сельском, водном и лесном хозяйстве и сроки их службы. - М.: Колос, 1982. - 26 с.
- 49.Организационно-технологический проект производства зерна кукурузы по интенсивной технологии/ Рекомендации. - М.: Россельхозиздат, 1988. -80с.: ил.

- 50.ОСТ 46172-84. Кукуруза. Выращивание на силос. Типовой технологический процесс. ОКСТУ 9704.-М.: Агропромиздат, 1987.-64 с.
- 51.Остапчук, Н.В. Математическое моделирование технологических процессов хранения и переработки зерна.- М.: Колос, 1977.-240 с.
- 52.Павлюченко, А.К. Экономика комбикормовой промышленности.- М.: Агропромиздат, 1990. - 208 с.
- 53.Палкин, А.В. Повышение эффективности функционирования молотковой безрешётной дробилки кормов: Автореф. дис... канд. техн. наук. -Киров, 2000. - 19 с.
- 54.Патент № 2,572,413 (США). Continuous muller/ A.A.Wickland.
- 55.Патент № 2.058.608 А (Англия).Pulverisers, Commonwealth of Australia/Michel Albert Jadouin.
- 56.Патент № 2.076.310 А (Англия).Hammer mill, Simon-Barron Limited /Richard Quentin Carmichael.
- 57.Патент № 2.437.872 (Франция). Broyeur a marteaux, notamment pour moudre des cereales, Simon-Barron Limited, residenten Grande-Bretagne/ Stewart Peter TresilianFlaser, Richard Quentin Carmichael.
- 58.Патент № 2119821 РФ. МПК 6 В 02 С 13/00. Дробилка молотковая безрешетная / Б.Г. Зиганшин, И.Е. Волков, Н.З. Хисметов, Р.Р. Валеева. – Заявлено 27.03.97. Оpubл. 10.10.98. Бюл. № 28.
- 59.Патент № 2120726 РФ. МПК 6 А 01 F 29/00. Устройство для плавного регулирования модуля помола в безрешетной молотковой дробилке кормов / Б.Г. Зиганшин, И.Е. Волков, Н.З. Хисметов. – Заявлено 29.01.97. Оpubл. 27.10.98. Бюл. № 30.
- 60.Патент № 2131776 РФ. МПК 6 В 02 С 13/02. Дробилка безрешетная молотковая / Б.Г. Зиганшин, И.Е. Волков, Н.З. Хисметов. – Заявлено 07.04.97. Оpubл. 20.06.99. Бюл. № 17.
- 61.Патент № 2137350 РФ. МПК 6 А 01 F 29/00, 29/02, 29/04, 29/10, В 02 С 13/00, 13/286. Устройство для регулирования степени измельчения в безрешетной молотковой дробилке кормов / Б.Г. Зиганшин, И.Е. Волков. – Заявлено 28.11.96. Оpubл. 20.09.99. Бюл. № 26.
- 62.Патент № 2236297 РФ. МПК 7 В 02 С 13/286. Дробилка молотковая / Б.Г.

- Зиганшин, И.Е. Волков, В.Ф. Фролов, А.А. Мустафин. – Заявлено 28.11.01.
Опубл. 20.09.04. Бюл. № 26.
- 63.Патент № 3,214,105 (США). Reduction mill/ R.E. Owens Enal.
- 64.Патент № 3,224,688 (США). Shredder /Rudolf E. Beiter.
- 65.Патент № 410810.
- 66.Патент № GB 2058608 (Англия)
- 67.Патент на изобретение 2596756 РФ – Опубл. 10.09.2016 г. Бюл. № 25.
Дробилка зерна с сеперацией/ Мусин Р.Р., Зиганшин Б.Г., Хайдаров Р.Р.,
Хасанова Ф.Ф.
- 68.Патент на изобретение 2667098 РФ – Опубл. 14.09.2018 г. Бюл. № 26.
Устройство для дробления зерна/ Зиганшин Б.Г., Дмитриев А.В., Хасанова
Ф.Ф.
- 69.Патент на полезную модель 155692 РФ – Опубл. 20.10.2015 г. Бюл. № 29.
Дробилка зерна / Мусин Р.Р., Зиганшин Б.Г., Хайдаров Р.Р., Хасанова Ф.Ф.
- 70.Патент на полезную модель 162595 РФ – Опубл. 20.06.2016 г. Бюл. № 17.
Дробилка молотковая безрешетная / Зиганшин Б.Г., Дмитриев А.В., Хасанова
Ф.Ф., Мусин Р.Р., Хайдаров Р.Р.
- 71.Патент на полезную модель 181466 РФ – Опубл. 16.07.2018 г. Бюл. № 20.
Устройство для дробления зерна / Зиганшин Б.Г., Дмитриев А.В., Хасанова
Ф.Ф.
- 72.Пилипенко, А.Н. Механизация переработки и приготовления кормов в личных
подсобных хозяйствах / А.Н. Пилипенко, А.В. Тимановский - М.:
Росагропромиздат, 1989. - 144 с.:ил.
- 73.Писаренко, В.Н. Планирование кинетических исследований / В.Н. Писаренко,
А.Г. Погорелов. М.: Наука, 1969.
- 74.Победнов, Ю.А. Степень измельчения массы // Кукуруза и сорго. - 1990.- №3.
- 75.Поярков, М.С. Совершенствование рабочего процесса молотковых дробилок с
жалюзийными сепараторами при одно- и двухступенчатом измельчении
зерна: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киров, 2001. – 22 с.
- 76.Прощак, В.М. Исследование и обоснование работоспособности и основных
параметров высокоскоростных молотковых кормодробилок: Автореф. дис...
канд. техн. наук. - Орджоникидзе, 1967. - 25 с.

- 77.Ревенко, И.И. О влиянии скорости молотков на эффективность процесса измельчения кормовых материалов. // Тракторы и сельхозмашины. - 1971. - № 3. - С. 31 - 33.
- 78.Ревенко, И.И. Распределение перерабатываемого материала в камере измельчения молотковой дробилки / Тракторы и сельхозмашины. – 1978. - № 7. С. 24-26.
- 79.Рублев, В.И. Методика ускоренных испытаний на износостойкость молотков кормодробилок / В.И. Рублев, И.Н. Иваненко // Испытания машин и оборудования для животноводства и кормопроизводства. Сб.науч.работ ВНИИМОЖ, 1986.-С. 23-33.
- 80.Рудаков, А.И. Разработка теории и технических средств технологического воздействия на влажные смеси в сельскохозяйственном производстве: Автореф. дис...д-ра техн. наук. – Казань, 2004. – 47 с.
- 81.Руководство по возделыванию гибридов кукурузы фирмы “Пионер” по зерновой технологии в республике Татарстан / Проспект фирмы “Пионер”, 1993. - 45 с.
- 82.Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов измерений. -М.: Наука, 1971.-192 с.
- 83.Саутин, С.Е. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. - Л.: Химия, 1975 .- 48 с.
- 84.Семенов, Е.В. Анализ эффективности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке / Е.В. Семенов, Л.А. Глебов // Повышение эффективности технологических процессов производства комбикормов: Сб. науч. тр. ВНИИКП ВНПО Комбикорм. - М., 1990. - Вып. 34. - С. 102 - 111.
- 85.Семенов, Е.В. Определение эффективности измельчения зерна в молотковой дробилке / Е.В. Семенов, А.А. Коробицын, В.А. Карамзин // Хранение и переработка сельхозсырья. - 1995. - № 1. - С. 38 - 40.
- 86.Семенов, Е.В. Расчет производительности молотковой дробилки / Е.В. Семенов, А.А. Коробицын, В.А. Карамзин // Хранение и переработка сельхозсырья.- 1996. - № 1. - с.18.
- 87.Сироткин, В.Т. К вопросу разрушения зерна в молотковой дробилке с подвижной декой // Совершенствование технологий и технических средств

- уборки, обработки и переработки зерна: Сб. науч. тр. — Воронеж, 1990. - С. 183-203.
88. Соколов, А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранения и переработке зерна. - М.: Колос, 1984. - 445 с.
89. Солнцев, Р.В. Совершенствование процесса измельчения и обоснование конструктивных и режимных параметров измельчения зерна центробежного типа: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Воронеж, 2000. - 23 с.
90. Соминич, Н.Г. Механизация животноводческих ферм. - М.-Л.: Сельхозгиз, 1957. - С. 276 - 303.
91. Спорыхин, В.В. Исследование взаимосвязи скоростного режима и диаметра рабочей камеры с мощностью электропривода дробилки с радиальной загрузкой: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Воронеж, 1976. — 24 с.
92. Спорыхин, В.В. Исследование взаимосвязи скоростного режима и диаметра рабочей камеры с мощностью электропривода дробилки с радиальной загрузкой: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Воронеж, 1976. - 24 с.
93. Справочник по качеству зерна и продуктов его переработки. - М.: Колос, 1971.- 352 с.
94. Справочник по качеству зерна. - Киев.: Урожай, 1983 - 175 с.
95. Сулима, М.А. Применение уравнений крупности для определения средних размеров частиц травяной муки // Механизация и электрификация сельского хозяйства: - Зап. Ленинградского СХИ.- Л., 1967.- т.108.- Вып.2.- С.232-237.
96. Сундеев, А.А. Исследование технологического процесса измельчения зерновых кормов: Автореф. дис... канд. техн. наук.-Воронеж, 1968.-25с.
97. Сундеев, А.А. О закономерностях разрушения зерна в молотковых дробилках // Совершенствование технологий и технических средств уборки, обработки и переработки зерна: Сб. науч. тр. - Воронеж, 1990. -С.160- 176.
98. Сыроватка В.И. Исследование процесса измельчения зерна ударом // Тракторы и сельхозмашины. - 1962. - № 11. - С.27-29.
99. Сыроватка, В.И. Исследование процесса измельчения зерна ударом // Тракторы и сельхозмашины. - 1962. - № 11. - С.27-29.
100. Сыроватка, В.И. Исследования основных закономерностей процесса измельчения зерна в молотковой дробилке кормов: Автореф. дис...

- канд.техн. наук. - М., 1964. - 36 с.
101. Сыроватка, В.И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке // Электрификация сельского хозяйства: Научные труды ВИЭСХ. - М., 1964. - С. 89 - 157.
 102. Сыроватка, В.И., Производство комбикормов в хозяйствах / В.И. Сыроватка, С.Г. Карташов. -М.: Росагропромиздат, 1991. - 40 с.
 103. Сысуев, В.А. Энергосберегающие машины и оборудование для кормоприготовления: исследование методами планирования эксперимента / В.А. Сысуев. - Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1999. - 294 с.
 104. Таджибаев, Б.М. Бесколосниковая горизонтальная дробилка пищевых отходов: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Балашиха, 1990. – 21 с.
 105. Тарасенко, А.М. Исследование влияния конструктивных параметров молотковой дробилки на эффективность измельчения зерновых кормов: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Воронеж, 1976. — 23 с.
 106. Технология переработки зерна / Под ред. Г.А. Егорова. - М.: Колос, 1977.-376 с.
 107. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента /В.Б. Тихомиров. М. Легкая индустрия. 1974.
 108. Турбанов, Н.В. Повышение эффективности процесса дробления зерна в молотковой дробилке путем разделения дерти воздушным потоком: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Киров, 2004. – 23 с.
 109. Фан Лянь-Цэнь. Дискретный принцип максимума / Фан Лянь-Цэнь, Вань Чу-Сен. // Пер с англ. под ред. А.И. Пропоя. - М.: Мир, 1967. - 180 с.
 110. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер. Изд.2-е., М., “Мир”, 1967 т.1., 498 с.
 111. Филинков, А.С. Повышение эффективности одно- и двухступенчатых дробилок зерна за счет совершенствования конструктивно-технологических схем: Автореф. дис...канд. техн. наук. – Киров, 2002. – 22 с.
 112. Филипова, А.Г. Исследование рабочего процесса молотковой дробилки с целью повышения качества размола и срока службы: Автореф. дис...канд. техн. наук. - Краснодар, 1975. - 27 с.
 113. Филиппова, А.Г. Исследование влияния величины зазора между концом

- молотка и декой на рабочие показатели безрешётных молотковых дробилок / А.Г. Филиппова // Вопросы механизации и электрификации сельскохозяйственного производства. - Зерноград, 1972. - Вып. 16. - С. 259 - 264.
- 114.Финни, Д. Введение в теорию планирования эксперимента / Д.Финни. -М.: Наука. 1970.- 288 с.
- 115.Хартман, К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов./ Под ред. Э.К. Лецкого.-М.: Мир, 1977.-552 с.
- 116.Хасанова Ф.Ф. Анализ конструкции дробилок кормов. Хасанова Ф.Ф., Мусин Р.Р., Зиганшин Б.Г. // «Научное сопровождение агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы» / Международная научно-практическая конференция посвященная 65-летию образования Института механизации и технического сервиса – Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2015 – С.395-401.
- 117.Хасанова Ф.Ф. Повышение энергоэффективности предприятия по производству мукомольной и крупяной продукции. Хасанова Ф.Ф., КашаповИльназ И., Зиганшин Б.Г. // Электротехнологии, оптические излучения электрооборудования в АПК / Материалы международной научно-практической конференции, посвященной памяти ведущего электротехнолога России академика Ивана Федоровича Бородин– Волгоград: Изд-во Волгоградского ГАУ, 2016 – С. 118-122.
- 118.Хасанова Ф.Ф. Путь к увеличению рентабельности кормоприготовления. Хасанова Ф.Ф., Сиразиев М.М., Мусин Р.Р. // Перспективные исследования и разработки молодых ученых / Материалы научно-практической конференции Института механизации и технического сервиса - Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2017 – С. 196.
- 119.Хасанова Ф.Ф. Совершенствование способов организации рабочих процессов измельчителей зерна. Хасанова Ф.Ф., Мусин Р.Р., Ситдилов Ф.Ф. // «Актуальная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы» / Научные труды II международной научно-практической конференции – Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2017 – С.67-72.
- 120.Хасанова Ф.Ф. Способы механического воздействия при измельчении фуражного зерна и их энергетическая оценка. Хасанова Ф.Ф., Мусин Р.Р.,

- Зиганшин Б.Г. // «Научное сопровождение агропромышленного комплекса: теория, практика, перспективы» / Международная научно-практическая конференция посвященная 65-летию образования Института механизации и технического сервиса – Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2015 – С.401-406.
- 121.Хикс, И. Основные принципы планирования эксперимента / И.Хикс. М.Мир.1967.
- 122.Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. - М.: Наука, 1972. - 299 с.
- 123.Храпач, В.Е. Экспериментально-теоретическое обоснование технологического процесса измельчения зерна и параметров молотковой дробилки открытого типа: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1983.-21 с.
- 124.Хусид, С.Д. Измельчение зерна / С.Д. Хусид. - М.: Хлебоиздат, 1958. - 248 с.
- 125.Хусид, С.Д. Измельчение зерна на молотковых мельницах / С.Д. Хусид. - М.:Заготиздат, 1947. - 128 с.
- 126.Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк.- М.: Мир, 1979, 133 с.
- 127.Энергоэкономическая дробилка центробежного типа / В.А. Денисов, В.И. Сыроватка, С.Г.Карташов, В.В.Фокин // Проспект ВИЭСХ., 1988.
- 128.Патент № 3,214,105 (США). Reduction mill/ R.E. Owens Enal.
- 129.Патент № 3,224,688 (США). Shredder /Rudolf E. Beiter.
- 130.Kick, F. “Das Gesetz der proporzionalenWiderstande”, Leipzig, 1885.
- 131.Rittinger, V.P. “Lehrbuch der Aufbereitungskunde”, Berlin, 1867.
- 132.Rumpf, H. “Struktur der Zerkleinerungswissenschaft”, “Aufbereitungstechnik”, № 8. 1966. S 421.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2596756**ДРОБИЛКА ЗЕРНА С СЕПАРАЦИЕЙ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет"*
(ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015115335

Приоритет изобретения **23 апреля 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **11 августа 2016 г.**

Срок действия патента истекает **23 апреля 2035 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.И. Исхоев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2667098

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ ЗЕРНА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Зиганишин Булат Гусманович (RU), Дмитриев Андрей Владимирович (RU), Сабиров Булат Миннефаилевич (RU), Хайдаров Рамиль Рафисович (RU), Хасанова Фарида Фаритовна (RU), Мусин Ринат Ринасович (RU), Гомаа Ибрахим Мохамед Омар (RU), Абдельфаттах Ахмед Хассан Абделькарим Омар (RU)*

Заявка № 2017113492

Приоритет изобретения 18 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 14 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 18 апреля 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 181466

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ ЗЕРНА

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Зиганшин Булат Гусманович (RU), Дмитриев Андрей Владимирович (RU), Сабиров Булат Миннефаилевич (RU), Хайдаров Рамиль Рафисович (RU), Хасанова Фарида Фаритовна (RU), Мусин Ринат Ринасович (RU), Гомаа Ибрахим Мохамед Омар (RU), Абдельфаттах Ахмед Хассан Абделькарим Омар (RU)*

Заявка № 2017115268

Приоритет полезной модели 28 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 16 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 28 апреля 2027 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 155692

ДРОБИЛКА ЗЕРНА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВПО Казанский ГАУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015117206

Приоритет полезной модели 05 мая 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 23 сентября 2015 г.

Срок действия патента истекает 05 мая 2025 г.



Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 162595

ДРОБИЛКА МОЛОТКОВАЯ БЕЗРЕШЕТНАЯ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВПО Казанский ГАУ) (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2015117502

Приоритет полезной модели 07 мая 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 мая 2016 г.

Срок действия патента истекает 07 мая 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

