МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
в г. Зернограде

На правах рукописи

ИВАНОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор А.М. Семенихин

Зерноград – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
1. ИЗМЕЛЬЧИТЕЛИ КОРМОВОГО ЗЕРНА
И ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА 9
1.1 Схемы, типы и особенности конструкций измельчителей зерна 9
1.2 Энергетика, производительность и применение 18
1.3 Вопросы теории, оценка энерготехнологических и структурных параметров измельчителей 29
1.4 Цели задачи исследования 36
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА 37
2.1 Физико-механические предпосылки снижения энергоемкости процесса измельчения 37
2.2 Геометрия и кинематика рабочей поверхности
дисков измельчителя 52
2.3 Энергетика процесса измельчения зерна в рабочем пространстве измельчителя 61
2.4 Выводы 64
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 65
3.1 Программа исследований 65
3.2 Приборы и оборудование для проведения экспериментальных исследований 65
3.3 Общая методика экспериментальных исследований 70
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 78
4.1 Физико-механические свойства и упруго-вязкие характеристики зерна 78

4.2 Результаты реализации полнофакторного эксперимента и анализ взаимодействия параметров измельчителя 82
4.3 Технологические параметры дискового измельчителя 87
4.4 Методика инженерного расчета 91
4.5 Выводы по главе 94
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА 95
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 107
ЛИТЕРАТУРА 109
ПРИЛОЖЕНИЯ 123

Введение

Анализ мирового и отечественного опыта ведения животноводства показывает, что только в условиях высокого уровня обеспеченности ферм полноценными кормами и современными машинами возможна реализация генетического потенциала животных и птицы. Без применения ресурсосберегающих машинных технологий, высокоэффективных комплектов машин и поточных линий невозможно решение жизненно важных рыночных проблем современного животноводства [1.2].

Ускорение создания, производства и применение новой техники – одно из приоритетных направлений в аграрной политики в условиях рыночной экономики и многоукладности хозяйствования [3].

Современная аграрная наука исходит из принципа – интенсификация, как основное развитие АПК в целом, не имеет альтернативы.

Суть интенсификации состоит в том, чтобы с каждого гектара земли, от каждого животного или иного биологического объекта получить больше продукции с минимальным использованием ресурсного потенциала [4].

Таков всеобщий принцип всех цивилизованных стран, в этом направлении должны формироваться основные положения исследований на путях решения задач агроинженерной науки в области механизации животноводства и кормопроизводства [5].

Концентрированные корма в рационах крупного рогатого скота составляют 25-60%, свиней и птицы – до 80-95% по питательности. В структкре себестоимости продукции животноводства корма стоят на первом месте и составляют 60-70% затрат. Эффективность применения концентрированных кормов зависит от качества их приготовления. Основными операциями приготовления комбикормов для животных и птицы

являются очистка, измельчение, дозирование и смешивание. Измельчение – самая энергоемкая операция, регламентируемая требованиями ГОСТ и зоотехническими рекомендациями по степени измельчения (модулю) и фракционному составу, в том числе допустимому содержанию пылевидной фракции. Отклонение от этих технологических требований снижает эффективность применения дорогих кормовых ресурсов (до 20-30%).

Широко распространенные для измельчения зерна в комбикормовой промышленности и сельском хозяйстве молотковые дробилки, не в полной мере отвечающие требованиям энергоресурсосбережения, при тонком (мелком) помоле дают до 40% пылевидной фракции, а при крупном (грубом) – до 20% целых и недоизмельченных зерен.

Как показал обзор и анализ литературных источников, посвященных вопросам переработки и повышения эффективности применения комбикормов в животноводстве и птицеводстве, а также выполненных в последние годы исследований и предложенные технические решения измельчителей позволяют существенно улучшить энерготехнологические характеристики процессов измельчения [53,54,60,72].

Большой вклад в развитие теории измельчения материалов растительного происхождения и создания рабочих органов внесли

В.П. Горячкин, П.А. Ребиндер, С.В. Мельников, Л.П. Кормановский, В.А. Сысуев, В.А. Денисов, В.И. Сыроватка, В.И. Пахомов, М.А. Тищенко, И.А.Хозяев, А.А. Перов, С.В. Золотарев, Н.М. Смирнов, В.А. Елисеев, Н.С. Сергеев, Л.А. Глебов, Ф.Г. Плохов, П.И. Леонтьев и др.

Ученые и последователи школы С.В. Мельникова считают энергетически целесообразным разрушение зерновок 1-2 ударами молотковыми дробилками и ударно-центробежными измельчителями.

Другие Л.А. Глебов, М.М. Гернет, С.В. Зверев, А.А. Хитов энергоэффективным считают разрушение зерновки наращиванием дефектов прочности при малых скоростях 15…25 ударами.

Однако ключевым элементом процессов обоих направлений является удар и вытекающие из этого динамические последствия – повышение в 1,6…2,4 раза сопротивления разрушению и неуправляемые технологические результаты.

Исследования последних лет указывают на возможность значительного повышения эффективности скармливания концентрированного корма за счет фракционирования его при измельчении для каждого вида животных. Переизмельчение зерна, негативно отражается на продуктивности животных и их здоровьи, вплоть до увеличения падежа, значительно ухудшает условия труда на протяжении всего технологического процесса от приготовления до раздачи кормов, а так же увеличивает энергоемкость процесса.

Одним из перспективных направлений в области измельчения зерна в последние годы становится разработка измельчителей центробежно-роторного дискового типов с несколькими ступенями измельчения, которые в настоящее время находят широкое распространение. В связи с этим совершенствование рабочего процесса дисковых измельчителей, направленное на повышение качества готового продукта и снижение энергоемкости процесса измельчения, является актуальной задачей, что позволяет сформулировать направления дальнейших исследований.

Научная гипотеза – снижение затрат энергии на процесс измельчения зерна и улучшение фракционного состава продуктов помола возможно за счет последовательного наращивания напряжений и дефектов прочности упруго-вязких составляющих структур зерновок и исключение заторов продуктового потока в рабочем пространстве измельчителя.

Рабочая гипотеза - последовательное безударное наращивание деформаций и дефектов прочности при измельчении зерна до требуемых размеров без образования заторов и пыли возможно в междисковом пространстве оригинальной геометрии.

Цель исследования. Разработка аналитических зависимостей функционирования дискового измельчителя кормового зерна, обоснованием его параметров и режимов работы.

Объектом исследований является технологический процесс безударного измельчения кормового зерна дисковым измельчителем.

Предмет исследований. Закономерности влияния параметров рабочих поверхностей дисков и упруго-вязких свойств зерна на энергетические и технологические показатели процесса измельчения.

Результаты исследования изложены в диссертационной работе, состоящей из пяти глав основного текста и приложений.

В работе приведен обзор и анализ современного состояния машинного обеспечения технологии приготовления концентрированных кормов и основной ее операции – измельчение, рассмотрены теоретические подходы к ее совершенствованию, снижению энергоемкости и повышению качественных характеристик.

На этой основе изложены механико-технологические и теоретические предпосылки реализации процесса измельчения в устройстве оригинальной конструкции, защищенном патентом РФ.

Приведена программа и методика экспериментальных исследований, их результаты и оценка.

Полученные результаты исследований позволили сформулировать:

Научную новизну представляют:

- закономерности взаимодействия зерновки с рабочими поверхностями геометрических элементов дисков, обеспечивающие нужную подачу;

- теоретические зависимости затрат энергии на деформацию зерновок в рабочих поясах дисковой пары с учетом их упруго-вязких свойств.

- новые понятия: приемный, подающий и модульный пояса, площадки релаксации, применительно к оригинальной геометрии поверхности дисков.

Методы исследования. Научные задачи, поставленные в работе решались теоретико-экспериментальными методами на основе законов

механики, теории деформирования упруго-вязких материалов, дифференциального и интегрального исчисления, математической статистики и планирования эксперимента.

Практическая ценность. Разработанный дисковый измельчитель кормового зерна (патент РФ на изобретение № 2511291), позволяющий существенно снизить энергоемкость процесса измельчения заданного гранулометрического состава и повысить эффективность его использования, методика инженерного расчета основных параметров измельчителей модельного ряда по заданной производительности.

Основные результаты работы доложены, одобрены и опубликованы в материалах научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и аспирантов Азово-Черноморской государственной агроинженерной академии (Зерноград, 2010-2014гг.)., V Международной научно-практической конференции в Ставропольском государственном аграрном университете (Ставрополь, 2010 г.). На 8-й и 9-й Международных научно-практических конференциях в СКНИИМЭСХ «Инновационные разработки для АПК» (Зерноград, 2013 и 2014 г.г.). Международной научно-практической конференции «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» посвященной 60-летию БГАТУ (Минск, 2014г.). Работа награждена серебряной медалью на XVII Агропромышленном форуме Юга России ИНТЕРАГРОМАШ (Ростов-на-Дону, 2014 г.). Работа награждена дипломом за второе место в номинации «лучший инновационный проект» на молодежном конвенте Ростовской области (Ростов-на-Дону, 2014 г.).

На защиту выносятся:

- теоретические зависимости процесса измельчения зерна дисковым измельчителем;
- техническое решение, реализующее процесс измельчения зерна по патенту РФ № 2511291;
- обоснование параметров и режимов работы дискового измельчителя зерна;
- методика инженерного расчета модельного ряда измельчителей кормового зерна.

1. ИЗМЕЛЬЧИТЕЛИ КОРМОВОГО ЗЕРНА И ТЕОРИЯ ПРОЦЕССА

1.1 Схемы, типы и особенности конструкций измельчителей зерна

Измельчение компонентов комбикормов одна из основных технологических операций процесса производства. Измельчение до необходимой крупности обеспечивает более полное усвоение животными питательных веществ, содержащихся в комбикорме и обусловливает возможность равномерного смешивания компонентов в смесителях после дозирования [24,25].

Конструкции измельчителей и их принципы действия зависят от физико-механических свойств измельчаемого материала [10,26,27].

В комбикормовой промышленности различают три степени крупности размола: крупный, если величина измельчения частиц 2,6—1,8 мм, средний 1,8—1,0 мм и мелкий 1,0—0,2 мм. Показателем качества размола является модуль крупности *M*, мм определяемый по формуле [14,19,20].

$$M= (0,5P_0+ 1,5P_1, + 2,5P_2 + 3,5P_3)/100 \quad (1.1)$$

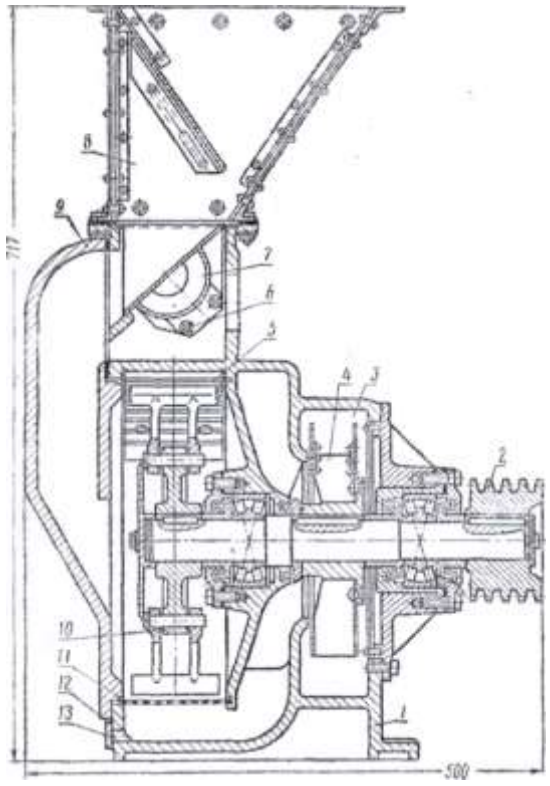
где P_o-остаток на сборном дне анализатора; P_1 P_2, P_3- остаток на ситах с отверстиями 1; 2 и 3 мм; 100 – масса средней пробы, г.

Компоненты измельчают в основном в молотковых дробилках и реже в вальцовых станках. Молотковые дробилки являются универсальными машинами, они могут размалывать любые компоненты комбикормов.

Независимо от степени измельчения и физических свойств продукта, конструктивных особенностей измельчающих машин они должны удовлетворять следующим требованиям: непрерывная, равномерная подача продукта в рабочую зону; равномерное его измельчение и быстрое удаление из рабочей зоны; возможность регулирования степени измельчения; легкая замена быстроизнашиваемых деталей машины; минимальный удельный расход энергии [30 – 32].

В зависимости от производительности, измельчаемого продукта изменяются размеры, масса и некоторые конструктивные элементы дробилок. Однако их общее устройство одинаково. Молотковые дробилки состоят из загрузочного устройства, молоткового ротора, броневых плит, ситовой обечайки, или колосникового устройства, устройства для вывода продукта из машины механическим или пневматическим транспортом, системы автоматического или ручного регулирования режима работы [33,37].

Дробилки ДДК и ДДЗ. Применяют для измельчения обогатительных смесей комбикормов, содержащих микроэлементы, антибиотики, витамины и другие сыпучие ингредиенты. В чугунном корпусе 1 (рисунок – 1.1.) смонтированы ротор 10 с молотками и на одном валу с ним вентиляторное колесо 4, сменное сито 11 и неподвижная дека 5. Вентиляторное колесо вращается в камере 3 корпуса дробилки.



1 - корпус; 2 - шкив; 5 -камера для вентиляторного колеса;
4 - вентиляторное колесо; 5 – дека неподвижная; 6-коробка для магнитов;
7 - магниты постоянные; 8 - бункер приемный; 9 – крышка торцовая;
10 - ротор; 11 - сито; 12 - планка; 13 -щель подачи воздуха.

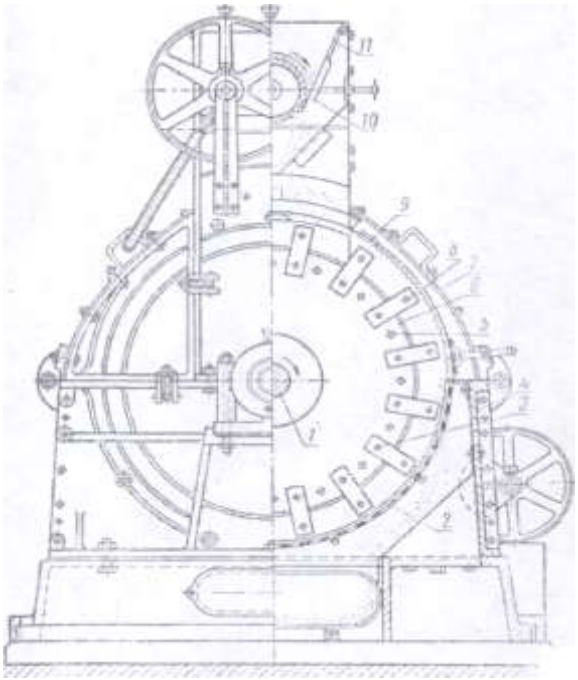
Рисунок 1.1 Молотковая дробилка ДДК (разрез)

Наличие торцовой крышки 9 в корпусе и консольное расположение ротора позволяет легко заменять молотки и сита при износе.

На корпусе расположен приемный бункер 8 с окном из органического стекла, а в бункере задвижка для регулирования количества поступающего на измельчение продукта. Для очистки исходного продукта от металломагнитных примесей в латунной коробке 6 установлены постоянные магниты 7.

В передней стенке корпуса предусмотрены щели 13 для добавочной подачи воздуха в дробилку. Величину этих щелей можно регулировать специальной планкой 12.

Ротор дробилки приводится во вращение от электродвигателя через клиноременную передачу и шкив 2.



1–вал; 2 – сито; 3 – стержень; 4 – станина; 5 – болт; 6 – диск; 7– пространство для сбора металлических примесей; 8 – молоток; 9 – плита броневая; 10 – валик рифленый; 11 – шарнирная заслонка.

Рисунок 1.2 – Молотковая дробилка ДДЗ

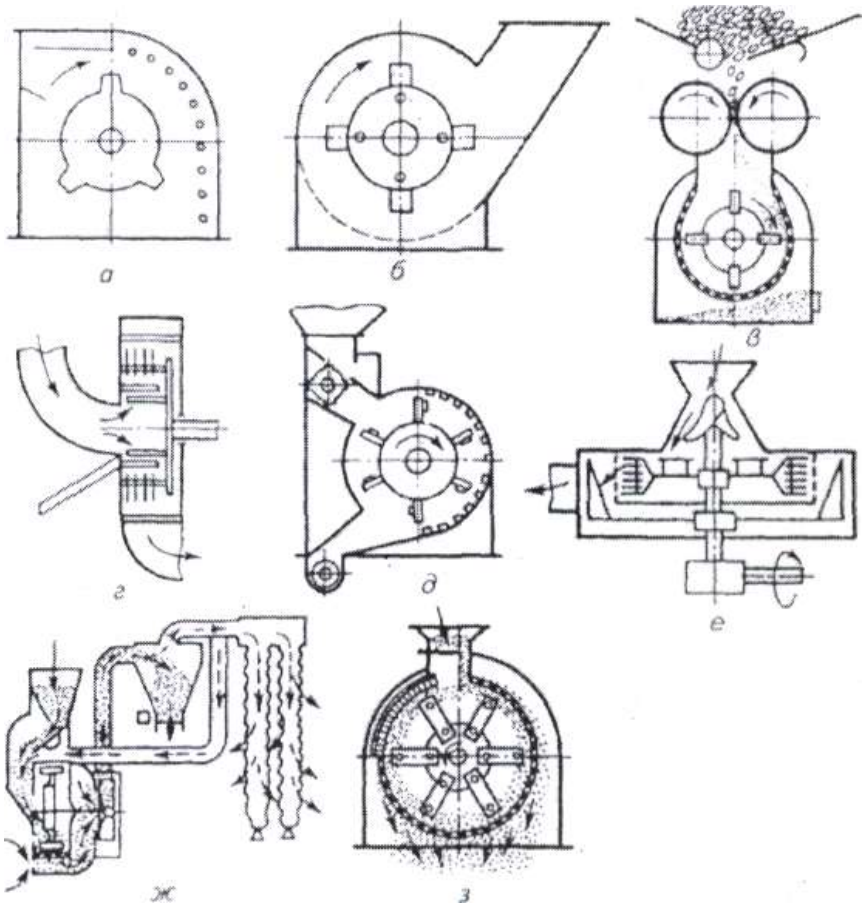
Данные испытаний дробилки ДДК позволяют сделать такие выводы: продукты измельчения, полученные при применении скобчатых молотков, отличаются большей дисперсностью, чем продукты, полученные,

при применении пластинчатых молотков; нельзя применять эти дробилки для измельчения соли и мела;

пластинчатые молотки лучше измельчают упругие и эластичные продукты, например зерно, барду, кормовые антибиотики, а скобчатые молотки - более твердые продукты.

В исследованиях рабочего процесса молотковых дробилок особое внимание уделяется воздушному потоку, определяющему их конструктивно-технологические схемы (рис 1.3) [28,29,34].

Внимания заслуживает организация воздушных потоков, которые способствуют измельчению и транспортированию измельченного продукта.



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

Рисунок 1.3 – Конструктивно-технологические схемы молотковых дробилок

Быстровращающийся молотковый ротор дробилки, действуя как вентиляторное колесо, нагнетает воздух сквозь отверстия сита, удаляя измельченный продукт.

Однако при этом очень трудно бороться с запылением помещения, так как повышенное давление внутри дробилки создает поток пыльного воздуха из рабочего пространства дробилки наружу.

В зависимости от размеров и механических параметров продуктов измельчения и требуемого технологического результата применяются молотки различной конфигурации и массы (рис 1.4).

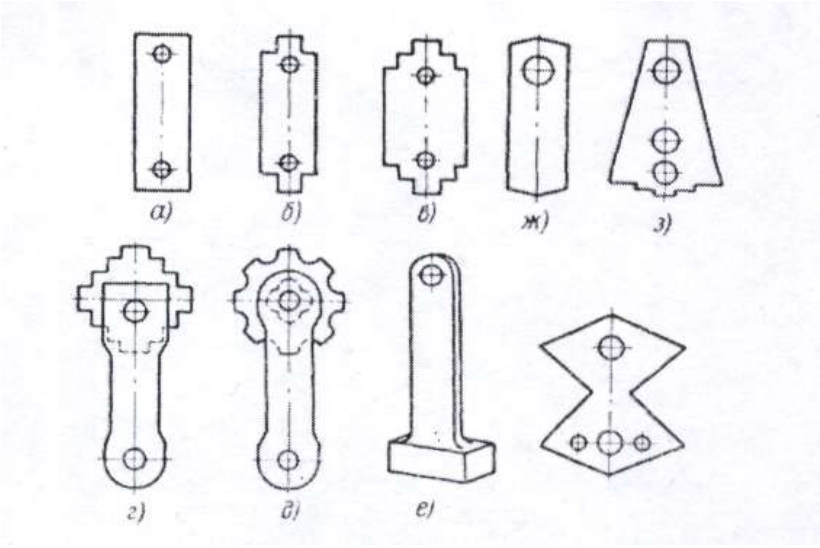
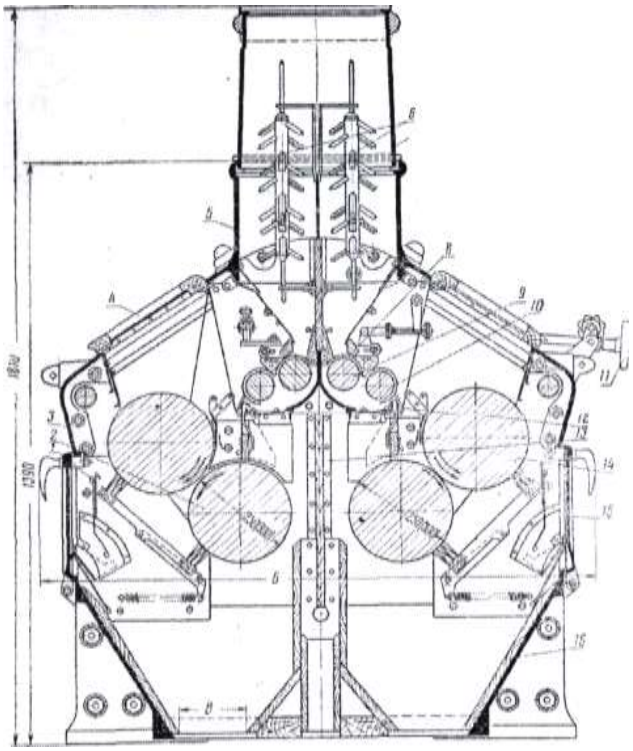


Рисунок 1.4 –Типы молотков, применяемых в молотковых дробилках

В вальцовом станке зерна или их частицы измельчаются в клиновидном пространстве, образованном поверхностями двух цилиндрических параллельных вальцов, вращающихся навстречу друг другу. Разрушение зерен происходит под действием сжатия и сдвига. В зависимости от структурно-механических свойств зерна и соотношения между величиной межвальцового зазора и размером измельчаемых частиц. Разрушение зерен за один пропуск между вальцами может быть как однократным, так и многократным. Это, естественно, предопределяет как степень измельчения зерна, так и качество продуктов измельчения.



1 – щетка; 2 – медленновращающийся валец; 3—боковая связь;4 – верхняя дверка; 5 – крышка с раструбом для питающей трубы; 6 – поплавок; 7 – питающая труба;

Рисунок 1.5 – Общий вид вальцового станка типа ЗМ

Жерновые мельницы с горизонтально расположенным ведущим валом. Принцип работы этих мельниц также основан на растирании зерна плоскостями жерновов, которые многократным воздействием на зерно размалывают его в муку и дерть [19,20].

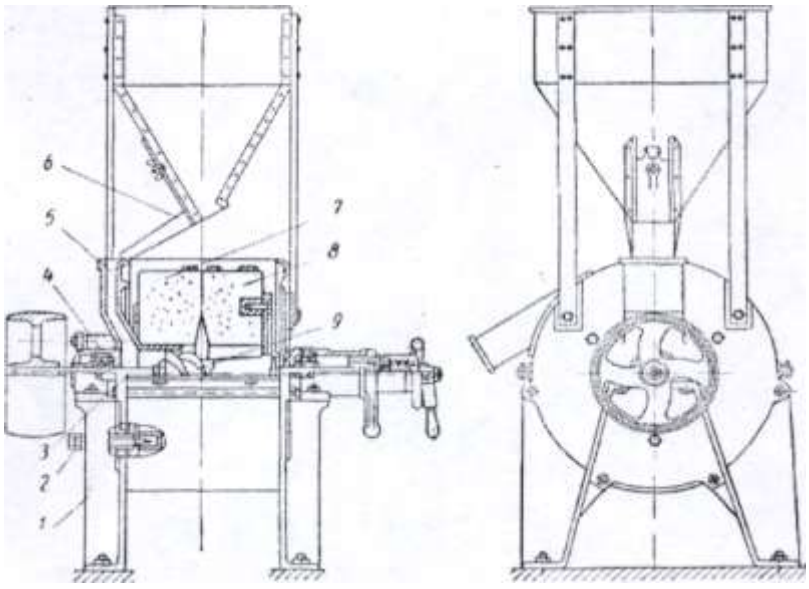


Рисунок 1.6 – Мельница ММЖ-0,5 с горизонтально расположенным валом

На горизонтальном ведущем валу *3,* вращающемся в двух шариковых подшипниках *4,* жестко укреплен жернов *8.* Жернов болтами крепится к чугунному диску, жестко связанному с валом.

Неподвижный жернов 7 имеет большое центральное отверстие, через которое зерно подводится к рабочим поверхностям жерновов. Жернов прикреплен к левой боковине *1* тремя специальными винтами *2,* обеспечивающими правильную установку неподвижного жернова относительно подвижного.

На ведущем валу около подвижного жернова жестко посажен двухходовой шнек *9,* служащий для обеспечения равномерной подачи зерна, поступающего из бункера на рабочие поверхности.

Степень дробления зерна регулируют путем изменения зазора между рабочими поверхностями жерновов специальным механизмом, установленным на конце вала.

Дисковые мельницы. Цельнокруговые мельницы для размола зерновых и других культур, и все это в сочетании с невысоким потреблением электроэнергии, бесшумностью и минимальным уровнем запыленности [39 – 42].

В настоящее время для измельчения кормового зерна отечественной промышленностью освоено производство большой номенклатуры измельчителей различной конструкции, компоновки, принципов действия и производительности применительно к масштабам производства, формам собственности, специализации и кормовой базе, а также финансовым возможностям хозяйств [33,43,44].

Более того, официальная информация о параметрах как новой техники, так и широко распространенных моделей весьма ограничена [45,46] и не позволяет принять оптимальные технико-технологические решения (табл. 1.1)

Отсутствуют в данных таблицы сведения о фракционном составе готового продукта, мучной пыли и целых зерен. Энергетические показатели, как правило, занижены и соответствуют реальному уровню только для

дисковых и вальцовых рабочих органов, которые принципиально отличаются по времени и характеру процесса измельчения от молотковых и ударно-центробежных дробилок.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики некоторых измельчителей зерна

Марка, модель	Подача, т/ч	Мощность, кВт	Частота вращения, мин$^{-1}$	Скорость рабочих поверхностей, ·с$^{-1}$	Удельная энергоемкость, кВт·ч/т	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
КДМ-5	до 5	30	2940	73,5	6,0***	молотковая
ДМВ	9-18	75-132	1500		8,33-7,33***	вертикальная
КД-2А	до 3	22	2725	68,1	7,33	90 молотков
УФИ (ГНУ ВНИИМЖ)	3-4	30	—	—	10-7,5	**
Ф-1М	до 2	23,1	2950	73,5	11,55	54 молотка
КДМ-2	до 2	30	2725	68,125	15,0***	90 молотков
3С25×80	до 4	18	678	8,475	4,5	частота нарезных вальцов
3М25×80	2,0	14	430 350	5,375 4,375	7,0	нарезн., гладкие вальцы
Skiold SK-2500 SK-5000	0,5-2 2,8-13,5	5,5 22,0	3000 3000	—	11-2,75* 7,25-2,93*	дисковая
Skiold-Prof 10T	6,8-13,5	55	3000	—	8,08-4,07*	дисковая

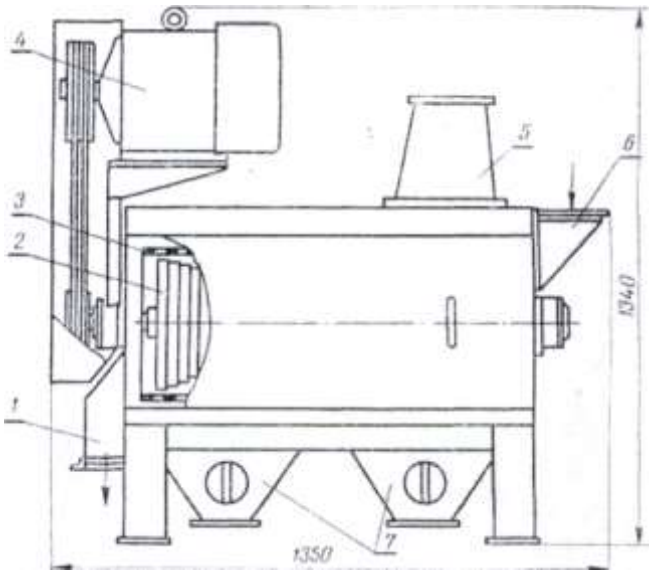
* - содержание в помоле фракции диаметром менее 1 мм 50%

** - уменьшение содержания мучной пыли на 9-17%

*** - содержание пылевидных частиц 40%

Бичевая машина МБО. Применяют на мукомольных заводах для разделения на крупную и мелкую фракции продуктов измельчения вальцовых станков I, II и III драных систем и для вымола сходов последних драных систем.

Рабочими органами машины (рисунок 1.7) являются неподвижный ситовой цилиндр 3 и бичевой ротор 2. Привод бичевого ротора от электродвигателя 4 через клиноременную передачу.



1,6 – патрубки; 2 – бичевой ротор; 3 – ситовой цилиндр; 4 – электродвигатель; 5 – аспирационный патрубок; 6 – приемный патрубок; 7 – конусы.

Рисунок 1.7 – Бичевая машина МБО

1.2 Энергетика, производительность и применение

Измельчением называется процесс механического разделения твердого тела на части. При этом действующие на тело внешние силы превосходят силы молекулярного сцепления [47].

Теория измельчения или массового разрушения твердых тел рассматривает два комплекса основных вопросов. Во-первых, она изучает основные закономерности в распределении частиц по размерам с целью отыскания простых методов определения их средних значений и степени измельчения. Во-вторых, она исследует функциональные зависимости между затратой энергии на процесс измельчения и степенью измельчения, что позволяет оценить эффективность рабочего процесса измельчителя по принятой технологии, конструкции и режимам работы.

В результате измельчения образуется множество мелких частиц с сильноразвитой поверхностью. Поэтому измельчение можно охарактеризовать как процесс приращения новых поверхностей. Количественной мерой дисперсности или развитости поверхности частиц служит удельная площадь поверхности.

Технологические схемы измельчителей предусматривают снижение энергозатрат, улучшение качества помола, механизацию загрузки и разгрузки дробильной камеры. Для рабочего процесса молотковой дробилки с решетом, установленным непосредственно в камере дробления, характерны некоторые недостатки. Так, измельчение материала до требуемой степени происходит в дробильной камере, после чего его удаляют. При этом образуется большое количество пылевидных частиц и увеличиваются энергозатраты вследствие циркуляции продукта в дробильной камере.

В теории измельчения принято определять:

объемную удельную площадь поверхности, ($м^{-1}$),

$$S_{у.о} = 6/d, \tag{1.2}$$

массовую удельную площадь, ($м^2/кг$)

$$S_{у.о} = 6/\rho d, \tag{1.3}$$

где d – средний размер частиц, м; ρ- плотность материала, $кг/м^3$.

Из формул следует, что для определения удельной площади поверхности измельченного материала надо знать его плотность и линейные размеры частиц. Средневзвешенный размер частиц независимо от их формы принято называть диаметром.

Глубина процесса диспергирования, влияющая на энергозатраты, оценивается степенью измельчения. Численно степень измельчения равна отношению удельной площади поверхности $S_{у.к}$, частиц конечного продукта измельчения к удельной площади поверхности S, кусков исходного материала, т. е.

$$\lambda_s = S_{ó.ê}/S \tag{1.4}$$

Степеню измельчения λ материала принято называть отношение среднего размера D кусков исходного материала к среднему размеру и d частиц продукта измельчения:

$$\lambda = D/d \tag{1.5}$$

Учитывая разнообразие и сложность форм зерен сельскохозяйственных культур, их размеры наиболее удобно характеризовать величиной эквивалентного диаметра $D_э$. Под эквивалентным диаметром зерна следует понимать диаметр шара, объем которого равен действительному объему зерна: Если за объем одного зерна принять v_c.то объем равновеликого шара будет $\pi D^3_ý/6$. Тогда эквивалентный диаметр зерна

$$D_Э = \sqrt[3]{\frac{6v_3}{\pi}} = 1.24\sqrt[3]{v_3} \tag{1.6}$$

С учетом этого начальная удельная площадь поверхности $S_н$,. зернового материала перед измельчением будет $6/(\rho D_э)$.

При разработке методики определения степени измельчения следует учитываются специфичные свойства различных видов кормов. Так, при определении степени измельчения стебельных кормов определяющими размерами являются исходная длина стеблей и длина частиц резки, или длина частиц травяной муки.

Зоотехническая наука рекомендует для каждого вида животных и птицы измельченный корм с частицами определенного размера. Крупность всей массы сыпучего материала как статистической совокупности оценивают по содержанию в ней классов или фракций определенных размеров, т. е. по гранулометрическому составу. Гранулометрический состав измельченных кормов можно определить тремя способами: ситовым - рассев массы на ситах по классам; седиментометрическим разделение на фракции по скорости оседания частиц в жидкой среде; микроскопическим - измерение, характерного линейного размера частиц под микроскопом. Первый способ применим, если частицы крупнее 40 мкм, второй — если их размеры находятся в пределах 5...50 мкм; третий - при размерах частиц менее 50 мкм.

На практике наиболее распространен ситовой анализ, при котором измельченный корм, например дерть, просеивается на ситовом анализаторе через набор тканых сит с квадратными отверстиями или пробивных сит с круглыми отверстиями. Проход с нижнего сита собирается в поддон. Средневзвешенный диаметр частиц дерти, или, как принято его называть, модуль М, определяют по формуле

$$M= (0,5P_0+ 1,5P, + 2,5P_2 + 3,5P_3)/100, \quad (1.7)$$

где P_O— массовый остаток на поддоне, *г:* P_1, P_2,P_3- массовые остатки на ситах с отверстиями соответственно диаметром 1,2 и 3 мм.

В общем случае средневзвешенный диаметр частиц (ГОСТ 8770–58) вычисляют по формуле

$$d = S\frac{d_i P_i}{100} = \frac{d_1 P_1 + d_2 P_2 + ... + d_n P_n}{100}, \quad (1.8)$$

где d_i — средний размер отверстий двух смежных сит,мкм; $P_г$ массовый выход частиц конкретного класса, % ($\Sigma P_i = 100\%$).

Графическое изображение гранулометрического состава продуктов измельчения называют характеристиками крупности или помольными характеристиками. На рисунке (1.8) показаны помольные характеристики кормов, построенные по результатам ситового анализа.

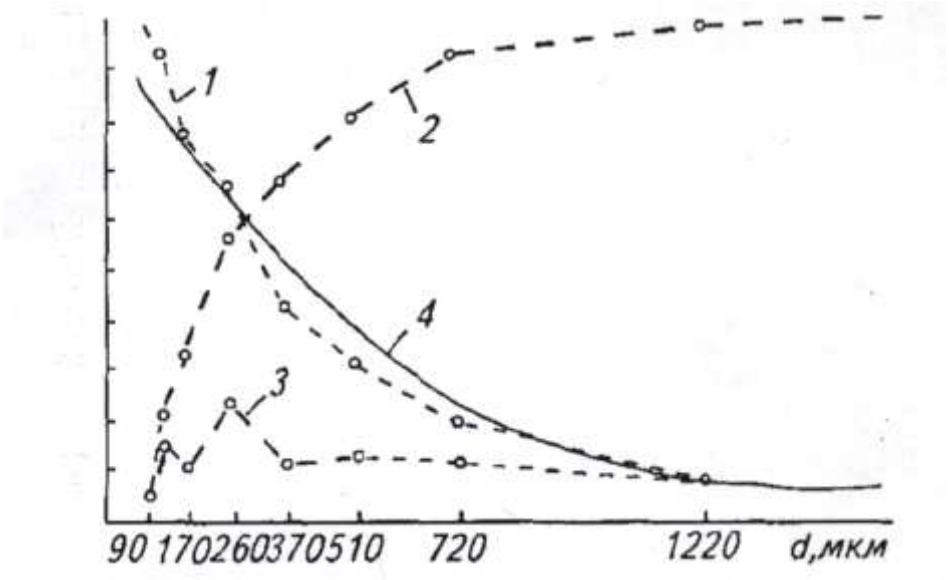


Рисунок 1.8 – Помольная характеристика комбикормов по С.В. Мельникову

По оси абсцисс отложены размеры отверстий сита в микрометрах, а по оси ординат — массовые выходы в процентах.

В зависимости от метода построения характеристики крупности могут быть частными (распределения), суммарными (интегральными) и вариационными. В частной характеристике ордината, отложенная из точек на оси абсцисс, соответствующих среднему диаметру отверстий двух смежных сит, показывает массовый выход в процентах, оставшийся на сите данной фракции.

При построении суммарной характеристики каждая ордината отражает суммарный выход К, %: кривая *1*— «по плюсу»; кривая *2*— «по минусу». Суммарный выход «по плюсу» соответствует количеству в пробе материала частиц, размеры которых крупнее выбранного размера, т. е. это сходы всех сит, которые расположены выше выбранного сита, включая остаток и на этом сите. Суммарный выход «по минусу» (проход) показывает количество частиц в пробе материала, размеры которых меньше выбранного размера. Обе суммарные характеристики являются зеркальным отображением одна другой.

Дифференциальная кривая *3* представляет собой вариационный ряд, или полигон распределения, размеров частиц по классам, а линия 4 – аппроксимирована «по плюсу».

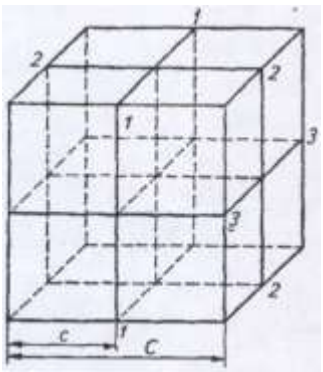


Рисунок 1.9 – Иллюстрация к определению вновь образованной поверхности при измельчении тела кубической формы: 1, 2, 3 - плоскости сечения куба

Для построения выровненной характеристики крупности профессор С. В. Мельников рекомендует использовать известное уравнение Розина-Раммлера [47]

$$R_x = 100exp(-bx^n), \quad (1.9)$$

где R_x - - остаток на сите с размером отверстий x в суммарных «по плюсу» процентах по массе; x – средний размер частиц выбранного класса, мкм; b и n — постоянные коэффициенты, или параметры распределения.

Опытные значения постоянных коэффициентов (по С.В. Мельникову) для зерновой дерти – b=0,003...0,035, n=0,55...0,7; для травяной муки – b=0,004...0,03, n = 1,28... 1,73.

Для определения работы измельчения учеными предложены две энергетические теории: поверхностная и объемная. Поверхностная теория, сформулированная немецким ученым П. Риттингером, основана на том, что работа A_R необходимая для измельчения тела, прямо пропорциональна площади вновь образованной поверхности:

$$A_R = f(\Delta S). \quad (1.10)$$

Если взять тело кубической формы с ребром C (рисунок 1.9) и измельчить его до частиц-кубиков с ребром c, то число полученных частиц

$$N_ч = \frac{C^3}{c^3} = \lambda^3. \quad (1.11)$$

Тогда площадь вновь образованной поверхности

$$\Delta S = 6c^2 N_ч - 6C^2 = 6C^2(\lambda - 1). \quad (1.12)$$

Если на образование единицы площади новой поверхности затрачивается работа A_R, то полная работа, затраченная на процесс измельчения (по П. Риттингеру),[19].

$$A_R = A_0 \Delta S = 6A_0 C^2(\lambda - 1). \quad (1.13)$$

Поверхностная теория применима для оценки процессов тонкого измельчения, когда получается продукт с высокоразвитой удельной площадью поверхности. Однако при расчетах энергии на измельчение

крупных кусковых материалов по этой теории получаются большие погрешности. В связи с этим была разработана объемная теория русским ученым-механиком В. Л. Кирпичевым, а позднее она подтверждена применительно к процессам дробления полезных ископаемых немецким ученым Ф. Киком.

Согласно этой теории затраты энергии $A_к$ на измельчение тела прямо пропорциональны объему ΔV деформированной части тела:

$$A_к = f(\Delta V) \tag{1.14}$$

Но объем деформированной части тела пропорционален первоначальному его объему V. Следовательно, можно записать

$$A_b = K_b C^{2.5}, \tag{1.15}$$

где K_b — коэффициент пропорциональности.

Обе эти теории не учитывают следующие затраты энергии: первая - на деформирование тела, вторая - на образование новых поверхностей. Поэтому Ф. Бонд предложил объединяющую «примирительную» теорию, согласно которой работа, затрачиваемая на измельчение материалов, пропорциональна среднему геометрическому из V и S.

Анализируя эти теории, можно сделать вывод, что они выражают лишь частные случаи протекания процесса измельчения и не учитывают влияние на его энергоемкость таких конкретных фактор как дисперсность материала.

Конструкции и режимы работы измельчителей. Академик П. А. Ребиндер, учтя недостатки поверхностной объемной теорий, предложил оценивать работу измельчения следующей формуле:

$$A = f(\Delta V) + f_1(\Delta S), \tag{1.16}$$

где ΔV – объем деформированной части тела; ΔS – приращение удельной площади поверхности измельченного материала. Уравнение (1.17) в развернутом виде можно записать так:

$$A = A_V + A_S = K\Delta V + \alpha\Delta S \tag{1.17}$$

где A_V – работа, затрачиваемая на деформации в деформированной части тела; A_S – работа, затрачиваемая на образование новых поверхностей; K – коэффициент пропорциональности; α - коэффициент пропорциональности, учитывающий энергию поверхностного натяжения твердого тела.

Если первую составляющую уравнения (1.17) считать как работу упругих деформаций, а вторую как работу перенапряжения тела, то полезной будет лишь вторая составляющая. Поэтому эффективность измельчения тем больше, чем меньше прочность и соответственно меньше работа упругих деформаций.

Указанные выше формулы можно использовать лишь для качественного исследования рабочих процессов и сравнительных расчетов с целью выявления относительной величины энергии, затрачиваемой на измельчение [7,19,20].

Профессор С. В. Мельников, на основе теории академика П. А. Ребиндера, предложил рабочую эмпирическую формулу для определения затрат работы на измельчение:

$$A_И = c\left[c_v lg\lambda^3 + c_S(\lambda - 1)\right], \qquad (1.18)$$

где c - коэффициент, учитывающий влияние свойств зернового материала, способ измельчения, конструктивные особенности измельчителя и др.; c_V — коэффициент удельной работы упругих деформаций, Дж/кг; c_S, — коэффициент, выражающий удельную работу, которая затрачивается на образование новых поверхностей, Дж/кг; λ — степень измельчения.

В этой формуле коэффициент с выражает корреляционную связь между теоретическими и действительными затратами энергии на измельчение. Экспериментальное определение коэффициентов c_V и c_S. весьма трудоемко, поэтому при сравнительной оценке измельчителей по энергоемкости лучше пользоваться формулой:

$$A_И = c_1 \lg \lambda^3 + c_2(\lambda - 1), \qquad (1.19)$$

где c_1 и c_2 — коэффициенты пропорциональности.

Оценивая рассмотренные теории измельчения с позиций их практической значимости, следует отметить, что в зависимостях для определения затрат энергии отсутствуют характеристики самих материалов и каких-либо параметров рабочих органов, что затрудняет формирование требований к разработке новых технических решений, или режимов [48–51].

Так например из широко распространенной модели образования новых поверхностей априори следует, что для беззаторного процесса измельчения, площадь рабочего пространства измельчителя должна соответствовать при $\lambda=2$ величине $2c^2$ (рис. 1.9), $\lambda=3$ – соответственно $3c^2$ и так далее $\lambda_i c^2$ для последующих ступеней или участков. Это условие не выполняется во всех роторных, молотковых и даже дисковых центробежных и ударно-центробежных измельчителей, что и определяет их высокую энергоемкость и неизбежное переизмельчение [52 – 57].

Это требование не относится к вальцевым схемам, так как условие соответствия имеет место в любом диапазоне λ, а повышенное перетирание, требуемое технологией, регулируется величиной дифференциала [20,32].

Механизм разрушения кормов. Корма относятся к упруго-вязко-пластическим материалам с выраженной анизотропией и значительными изменениями прочностных свойств в зависимости от физического состояния. Это связано с тем, что корма состоят из двух структурных элементов, скелета, или каркаса, обладающего упругими и пластическими свойствами, и заполнителя, обладающего вязкими свойствами [10].

Процесс разрушения таких материалов можно представить как усталостный под циклическим действием нагрузки. При действии внешних сил элементы скелета деформируются, а заполнитель оказывает вязкое сопротивление перемещению частиц скелета, увеличивая тем самым прочность и жесткость тела. Предел прочности скелета не зависит от времени действия нагрузки, а вязкое сопротивление заполнителя меняется во времени.

При длительном действии нагрузки заполнитель практически не оказывает сопротивления и прочность тела определяется прочностью скелета. Наоборот, при мгновенном действии силы заполнитель оказывает преимущественное сопротивление. Поэтому для разрушения такого тела нужна более высокая ударная нагрузка, так как сопротивление разрушению определяется совместной прочностью скелета и заполнителя [22,23].

Разрушение пластического твердого тела можно представить как появление микротрещин в скелете, развитие которых приводит к отделению его частей. В процессе измельчения этот процесс протекает с возрастающей скоростью. Причем зерно и корнеклубнеплоды имеют пространственную структуру в виде множества ячеек или сотов, заполненных крахмальными зернами, а стебельные корма волокнистую структуру, аналогичную древесине. Поэтому каждый из кормов этих видов обладает минимальным сопротивлением определенному виду деформации. Затраты энергии меньше при измельчении зерна и корнеклубнеплодов с применением удара, а стебельных кормов—резания [58 – 61].

В результате воздействия рабочих органов машин меняются форма, размеры, физическое состояние и свойства перерабатываемых кормов. Эти изменения зависят в первую очередь от физико-механических свойств исходных кормов, основное из которых—прочность.

Впервые диаграммы сжатия в координатах усилие - деформация для зерен фуражных культур при статическом (медленном) нагружении были получены профессором С. В. Мельниковым. На основании полученных диаграмм (рис. 1.10) установлено, что разрушение зерен происходит в три этапа: 1 – упругие деформации; 2 – пластические деформации; 3 - появление трещин, приводящих к образованию частиц. При динамическом (быстром) нагружении увеличиваются разрушающие нагрузки, так как упругие и пластические деформации, приводящие к образованию трещин в кормовых материалах, протекают при больших разрушающих усилиях. Поэтому при расчете затрат энергии на измельчение

для корма каждого вида разрушающие усилия, полученные в статических условиях, должны быть скорректированы на величину, которая обусловлена динамическими режимами работы измельчающих машин.

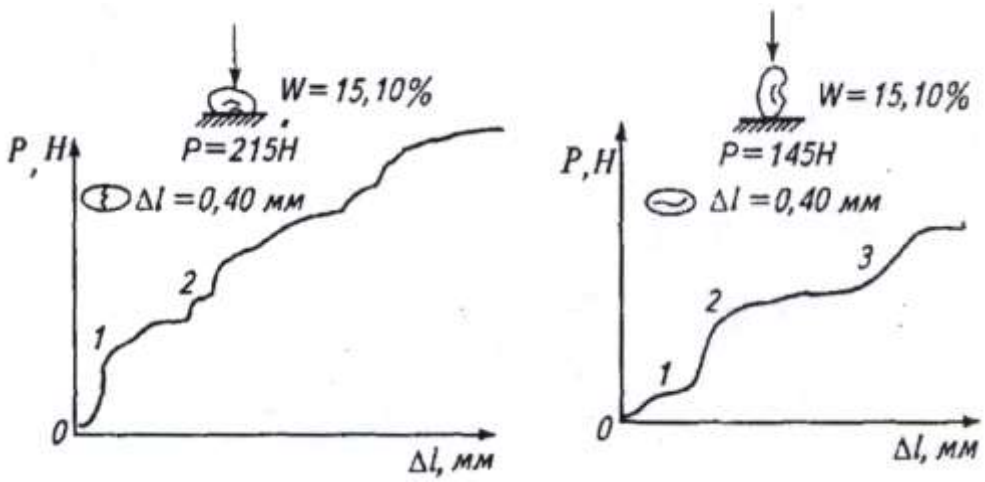


Рисунок 1.10 – Диаграммы сжатия зерен ячменя

Исходя из диаграмм, показатель пластичности предлагается определять по зависимости

$$e = \ln \frac{1}{1 - \Psi}, \qquad (1.20)$$

где Ψ - относительная деформация сжатия.

Применение термина «пластичность» в исследованиях целого ряда авторов не корректно, так как после пологих участков вновь наблюдается рост деформаций пропорциональный росту усилий с крутым восхождением.

Построение дифференциальной кривой по совокупности реализаций подтверждает упруго-вязкую природу поведения зерновок и после разгрузки, тогда как пластические материалы сохраняют заданную форму [21].

Широко известные в научной и учебной литературе диаграммы сжатия (рис. 1.10) не сопровождается пояснениями о времени проведения эксперимента и скорости нарастания деформации, что затрудняет их анализ и не позволяет оценить составляющие объекта и их роль в процессе измельчения, а также разрушающие напряжения.

1.3 Вопросы теории, оценка энерготехнологических и структурных параметров измельчителей

Исследования энергетики измельчения зерна для продовольственных и кормовых целей направлены в основном на получение количественных характеристик процессов взаимодействия рабочих органов машин с продуктом в виде усилий, удельной энергии и качественных результатов.

Основоположником этого направления является профессор Петербургского технологического института П.А. Афанасьев, опубликовавший в 1883 году первые работы по исследованию прочности зерна. Позднее в 1894 году работы профессоров К.А. Зворыкина, а затем П.А. Казьмина (1912) дополнили и расширили сформулированные им основные положения.

Наконец, благодаря работам, Н.Н. Орлова и П.П. Тарутина (1935г.), С.Д. Чистова (1936г.), профессора Куприца Я.Н. (1946г.) «Физико- химические основы размола зерна» и академика П.А. Ребиндера «Физико-химические исследования процесса деформирования твердого тела» были сформулированы консолидированные положения теории дробления твердых тел.

Объясняя, в целом, энергетическую сущность процесса, эти положения не в полной мере раскрывали направления снижения энергетики дробления и оптимизации его параметров.

Рабочая зависимость для определения удельной энергии дробления зерна С.В. Мельникова стала краеугольным положением в практическом применении объединенной теории П.А. Ребиндера для оценки энергетики процесса по его качественным показателям. Вместе с этим и эта зависимость лишь подтверждает применимость основных положений теории измельчения в широком ее толковании - зерно, гранулы, стебельные корма и др., не отвечая на вопрос существования предпочтительных параметрических сочетаний для описания функции энергоемкости процесса [7 – 9].

Разрушение твердых частиц на части связано, согласно рабочей гипотезе, с их деформацией и образованием поверхностей скалывания.

Так для разрушения эндосперма твердой пшеницы скалыванием требуется напряжение 0,95-1,10 мПа, мягких сортов 0,28-0,32 мПа. Удельная энергия измельчения, первичного разрушения зерна, поэтому также велика и находится на уровне 1,9-4 кДж/кг. Как и многие материалы растительного происхождения зерновки обладают упруго-пластическими свойствами. Соотношение между упругой и пластической составляющими в зависимости от химического состава и строения зерновок, составляет 10...35 (90...65) процентов. Таким образом основные затраты энергии измельчения находятся в области пластических деформаций.

Разделение процесса измельчения на этапы, учитывающие эти физико-химические особенности строения зерновок может оказаться перспективным на пути снижения затрат энергии на процесс в целом.

Поэтому особый интерес для оценки процессов измельчения зерна представляют процессы уплотнения материалов растительного происхождения [22 – 24, 62, 63].

Уплотнение материалов растительного происхождения сопровождают множественные технологические процессы земледельческой механики, в которых накапливается энергия упругих деформаций. Поэтому после снятия напряжений происходит упругое расширение. Такое явление свойственно всем измельчителям стебельных кормов, рабочими органами которых являются ножи, закрепленные на валах, барабанах или дисках. Повторные деформации необходимые для выполнения процессов резания, приводят к перерасходу энергии.

При длительном удержании материалов в напряженном состоянии, как показали исследования, упругое расширение уменьшается пропорционально времени удержания его под нагрузкой – энергия рассеивается в материале.

Влияние времени нагружения на материал получило название последействия.Практический интерес для совершенствования технологических процессов с явлениями последействия представляют две его стороны, это:- изменение напряжений во времени при постоянной деформации - релаксация;

- изменение деформаций во времени при сохранении постоянного напряжения – ползучесть.

Эти явления присущи широкому кругу материалов и достаточно изучены учеными. Джеймсом Клерком Максвеллом (1831-1879гг.), Людвигом Больцманом (1899г.), Вильгельмом Эдуардом Вебером. Позднее эти исследования получили развитие в работах А.П. Бронского, Ю.Н. Роботнова, А.Р. Ржаницына, а также И.А. Долгова, В.И. Особова, Г.К. Васильева, В.И Фомина и др.

Однако теория последействия Людвига Больцмана, при некоторых допущениях, объясняет взаимосвязи напряжений и деформаций упруго-вязких систем во времени, как полученных ранее, так и в последующие годы, исходя из следующих основных положений:

- материал, испытавший напряжение в прошлом, деформируется повторно иначе, чем в первый раз;

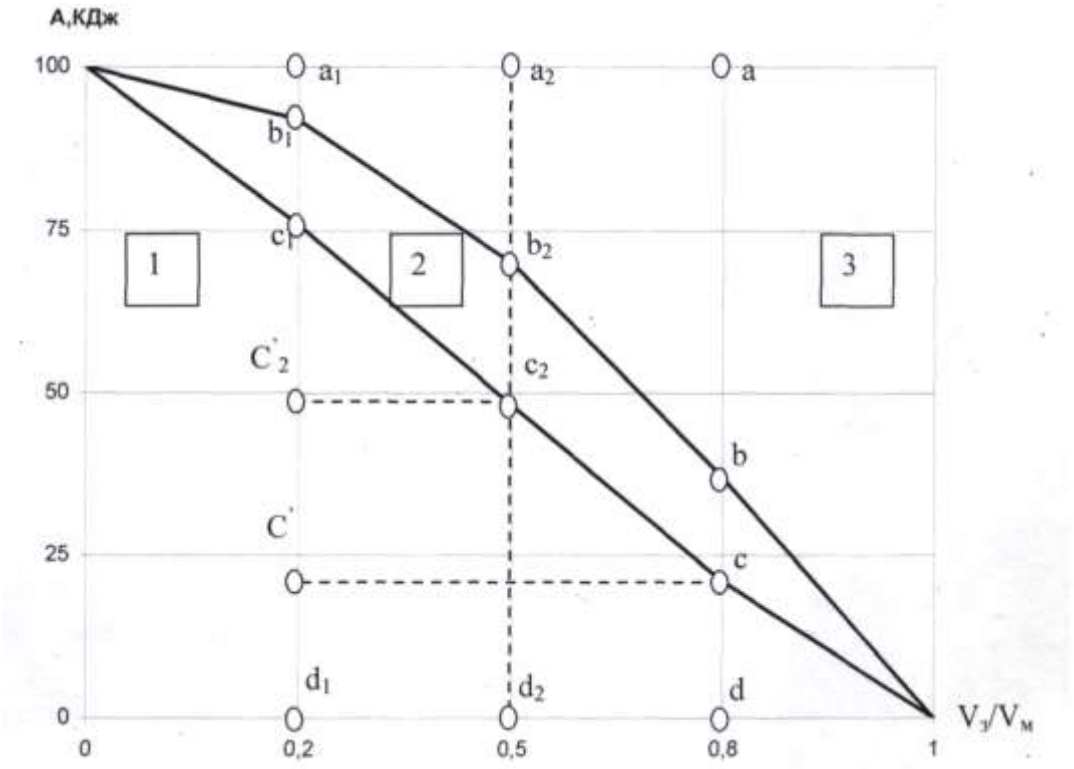
- уменьшение напряжений при повторной деформации тем больше, чем больше была первая деформация и чем дольше она длилась, и тем меньше, чем больше прошло времени от момента первой деформации;

- при наличии в прошлом многократных различных деформаций уменьшения напряжений, вызванные ими, не зависят одно от другого. Это положение носит название принципа суперпозиции.

А.Р. Ржаницын показал, что при незначительных деформациях и напряжениях деформирования большинство материалов может быть описано линейными уравнениями в отличие от закона Гука. В эти уравнения должно входить время, причем его связь с деформациями и напряжениями не

является функциональной и может быть задана в дифференциальной или интегральной форме [22].

Основные научные результаты по измельчению зерна получены при ударном сжатии, что позволяет рассмотреть сам процесс измельчения с позиций графо-аналитического представления его энергетики академиком В.П. Горячкиным (рисунок 1.11).



A - полная кинетическая энергия молотка; 1 - область полезной энергии; 2 - энергия частиц; 3 - энергия холостого хода; a b - ордината холостого хода; в c - ордината энергии частиц; c d - ордината полезной энергии (деформации); V_3 - скорость частиц; $V_м$ - скорость молотка; m и M - соответственно масса частиц и молотка

Рисунок 1.11 - К возможности снижения энергоемкости измельчения зерна

В области 1 вся кинетическая энергия молотка, затраченная на деформацию зерна при V_3=0. По мере движения вправо от V_3=0 доля энергии деформации уменьшится и в точке V_3/V_M=1 равна 0.

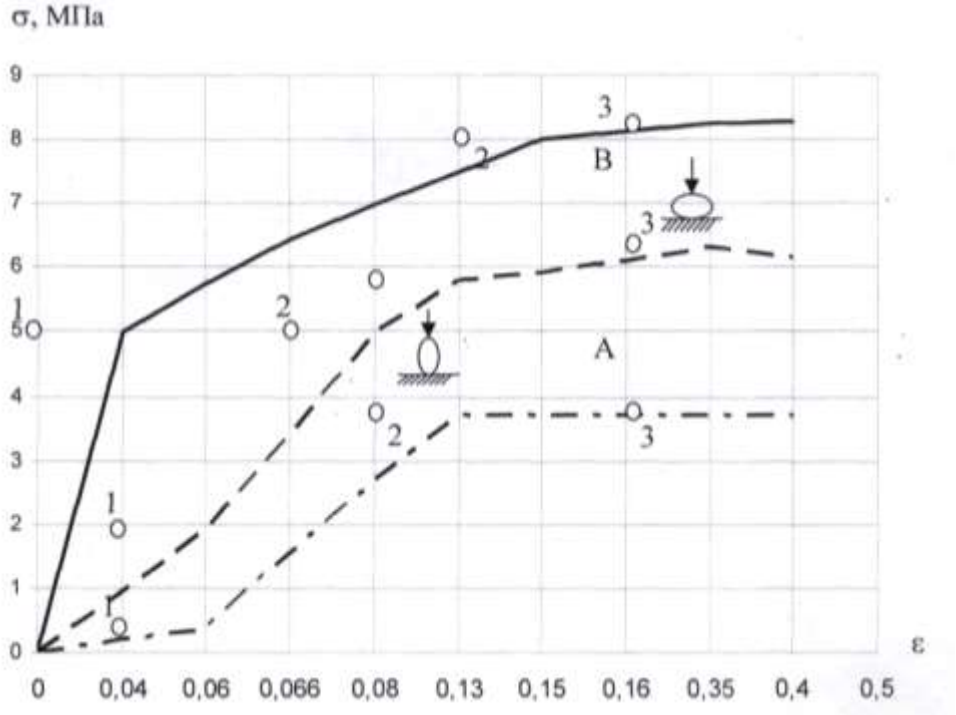
Известно, что в этой зоне V_3/V_M =0,75-0,85 работают молотковые дробилки и другие скоростные измельчители, решая задачу измельчения в

одном кинематическом и силовом режиме. При этом полезной энергией деформации может быть и энергия, сообщенная частицам (область 2) (рис. 1.11), так как скорость частиц после столкновения с молотком может быть разрушающей.

Тогда коэффициент эффективности Ψ процесса может оцениваться отношением

$$\Psi = b \cdot d/a \cdot d. \qquad (1.21)$$

Анализируя диаграммы сжатия зерен ячменя (рисунок 1.12 по С.В. Мельникову), можно достоверно утверждать, что процесс разрушения может быть выполнен в две стадии: на участке 0-1 и частично 1-2 в зависимости от структуры зерновки, упругая деформация усилие растет, и на участке2-3 - пластическая деформация – без увеличения усилия.



σ - напряжение; ε - относительная деформация;

А - область осевых (продольных) деформаций разрушения; В - область поперечных деформаций; 0-1 упругие деформации; 1-2 упруго-пластические деформации; 2-3 - пластические деформации

Рисунок 2 –Реализации диаграмм сжатия зерновок ячменя по С. В. Мельникову

Связь между σ и ε описывается уравнением линий тренда в отрезках в виде $\sigma = A_{\varepsilon} + B$ с коэффициентом корреляции R^2=0,866...0,724 и может быть признана функциональной, при A=(0,637...0,297) и B=(4,425...1,501), что позволяет судить об устойчивости процессов нагружения и разрушения во всем рабочем диапазоне ε=(0,08...0,4).

Воспользовавшись (рисунком 1.11), упругую деформацию технически можно выполнить в сечении $a_1 - d_1$ вальцовой или дисковой парой различной геометрии, а пластическую, окончательное измельчение, в сечении a-d_3. Тогда коэффициент энергетической эффективности процесса, гипотетически, может быть определен по аналогии с (1.21) по соотношению

$$\Psi_{г} = \frac{\left(cd + c_1 d_1 \right)}{2ad} \qquad (1.22)$$

Величина $\Psi_{г}$ значимо превышает величину Ψ (1.21), априори.

Фаза пластического, окончательного измельчения, может быть выполнена молотками со значительно меньшей рабочей скоростью $V_p < (0{,}4 - 0{,}6)V_M$, дисками или жерновами, пальцевыми, штифтовыми и иными рабочими органами, реализующими эффект П. А. Ребиндера снижения прочности при циклических нагружениях тел, получивших на первой стадии макродефекты прочности.

Экспериментальное исследование раздельного процесса измельчения предварительно деформированных вальцами зерновок порционной пальцевой дробилкой подтвердили эффект уменьшения времени окончательного измельчения на 28... 30 процентов по сравнению с однофазным при сравнимом модуле помола [64 – 66].

Изложенное позволяет сделать вывод о необходимости разработки схем и конструкций ступенчатых измельчителей с выделением готового продукта (фракции) после каждой ступени в том числе решетными

устройствами, позволяющим снизить эффект повторных разрушений, появление мучной пыли и затраты энергии на процесс в целом [67–69].

Выполненные в этом направлении исследования и разработки оригинальных технических решений и предложенные аналитические зависимости для определения составляющих баланса энергии и напряжений, соотношения поверхностей рабочих органов и числа их элементов, позволяют развивать поиск новых схемо-технических решений на путях энергоресурсосбережения и улучшения технологических характеристик продуктов измельчения [53,54, 70 – 74].

Величину напряжений, возникающих в объеме зерновки при ударе в центробежном измельчителе, предлагается определять как функцию числа ударов по зависимости

$$\sigma_n = \sigma_f + \left(\sigma_* - \sigma_f\right) \cdot exp\left(\frac{n-1}{n_x - 1}\right), \qquad (1.23)$$

где σ_f – напряжение, при действии которого разрушение не происходит при любом числе ударов (предел выносливости), МПа; σ_* – напяжение, при котором разрушение происходит за 1 удар (динамический предел прочности), МПа; n_* – характерное число ударов, при котором снижающаяся часть напряжений (σ_*- σ_f) уменьшается в e раз.

С учетом зависимости (1.23) можно получить полное выражение работы, затрачиваемой на разрушение зерна n ударами.

$$A = K_S \Delta S + \frac{\theta V}{2E} \cdot n\left[\sigma_f + \left(\sigma_* - \sigma_f\right) \cdot e^{\frac{n-1}{n_* - 1}}\right]^2, \qquad (1.24)$$

где θ – коэффициент рассеивания энергии; V – объем зерновки, м^3; E – динамический модуль упругости зерновки, МПа.

Здесь величины $K_S\Delta S$ и $\theta V/2E$ являются независимыми от числа ударов n и поэтому не влияют на характер изменений затрат энергии A, которые полностью определяются функцией $F(n)$:

$$F(n) = n\left[\sigma_f + (\sigma_* - \sigma_f)\cdot e^{\frac{n-1}{n_*-1}}\right]. \qquad (1.25)$$

Предложенные зависимости содержат характеристики зерна E – динамический модуль упругости, напряжения разрушения σ_* и сопровождающие их контактные напряжения σ_f, удерживающие зерновки или их частицы в состоянии напряжения.

При анализе работы ударно-центробежного измельчителя приводятся зависимости для определения скоростей перемещения зерна по рабочим поверхностям лопаток, производительности Q многоступенчатого измельчителя в зависимости от параметров рабочего органа и характеристик зерна [70,71].

$$Q = k_ç \frac{\pi d_ç^2 v}{4} \rho z, \qquad (1.26)$$

где $k_з$ – коэффициент заполнения межлопадочного пространства; $d_э$ – эквивалентный диаметр зерна, м; v – скорость перемещения зерна по лопатке, м/с; ρ – плотность измельчаемого материала кг/м^3; z – количество измельчающих лопадок.

Учитывая то, что с увеличением количества измельчающих лопаток расстояние между ними будет уменьшаться и может достигнуть критического значения, т.е. оно может стать меньше размеров частицы зерна и измельчитель не будет работать, то количество лопаток должно быть ограничено условием:

$$z \le \frac{\pi D_0}{d_ý + \delta}, \qquad (1.26)$$

где D_0 – диаметр загрузочной камеры, м; δ – толщина измельчающей лопатки, м.

Приведенный обзор конструкций измельчителей и анализ теоретических зависимостей и положений, высказанных исследователями

процессов разрушения материалов растительного происхождения, позволяет сформулировать научную гипотезу в следующей редакции.

Затраты энергии на разрушение (с целью измельчения) материалов с упруго-вязкими характеристиками могут быть значительно снижены, за счет предварительной деформации, приводящей к дефектам прочности с последующей ступенчатой дезинтеграцией в заданном соотношении, с минимальным выделением пылевидной фракции.

Представленная научная гипотеза позволяет сформулировать цель и задачи исследования.

1.4 задачи исследования

Представленные научная и рабочая гипотезы позволили сформировать цель исследования для достижения которой потребовали решения следующие, основные задачи:

- определить упруго-вязкие характеристики зерновок основных кормовых культур.
- разработать теоретические зависимости процесса измельчения зерна в дисковом измельчителе.
- обосновать рациональные конструктивные и режимные параметры дискового измельчителя.
- провести технико-экономическое обоснование предлагаемого решения.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

2.1 Физико-механические предпосылки снижения энергоемкости процесса измельчения

Исследование энергетики измельчения зерна для продовольственных и кормовых целей направлены в основном на получение количественных характеристик процессов, взаимодействия рабочих органов машин с продуктом в виде усилий, удельной энергии и качественных результатов.

Сформулированные консолидированные положения теории дробления твердых тел в целом объясняют энергетическую сущность процесса, но не в полной мере раскрывают направления снижения энергетики дробления и оптимизации его параметров.

Разрушение твердых тел на части связано, согласно рабочей гипотезе, с их деформацией и образованием поверхностей скалывания.

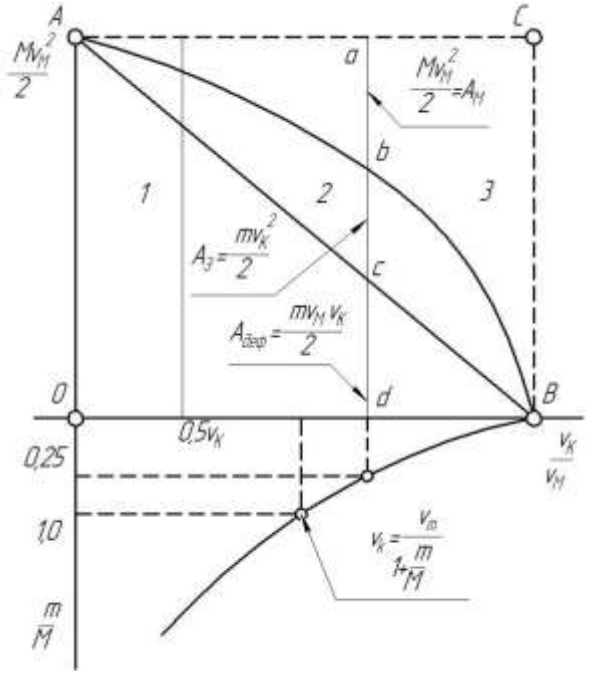
Так, для разрушения эндосперма твердой пшеницы скалыванием требуется напряжение 0,95-1,10 мПа, мягких сортов – 0,28-0,32 мПа. Поэтому удельная энергия разрушения зерна также велика и находится на уровне 1,9-4 кДж/кг. Как и многие материалы растительного происхождения, зерновки обладают упруго-вязкими свойствами. Соотношение между упругой, вязкой и пластической составляющими в зависимости от химического состава зерновок составляет 10-35 (90-65) %. Таким образом, основные затраты энергии измельчения находятся в области пластических деформаций [59,75,76].

Разделение процесса измельчения на этапы, учитывающие эти физико-химические особенности строения зерновок, является перспективным на пути снижения затрат энергии на процесс в целом.

Основные научные результаты по измельчению зерна получены при ударном сжатии, что позволяет рассмотреть сам процесс измельчения с позиций графоаналитического представления его энергетики (рис 2.1).

В области 1 вся кинетическая энергия молотка, затраченная на деформацию зерна при $V_к$= 0. По мере движения вправо от $V_к$=0 доля энергии деформации уменьшается и в точке $V_к/V_м$ равна 0 (нулю).

Известно, что в этой зоне $V_к/V_м$ 0,75-0,85 работают молотковые дробилки и другие скоростные измельчители, решая задачу измельчения в одном кинематическом и силовом режиме. При этом полезной энергией деформации может быть и энергия, сообщенная частицам (область 2, рис.2.1), так как скорость частиц после столкновения с молотком может быть разрушающей [77 – 80].



A_0 – полная кинетическая энергия молотка; *1* – область полезной энергии; *2* – энергия частиц; *3* – энергия холостого хода; *ab* – ордината холостого хода; *bc* – ордината энергии частиц; *cd* – ордината полезной энергии (деформации); $V_к$ – скорость частиц; $V_м$ – скорость молотка;
m и *M* – соответственно масса частиц и молотка.

Рисунок 2.1- К возможности снижения энергоемкости процесса измельчения

Тогда коэффициент эффективности ψ процесса будем оцениваться отношением $\psi = bd/ad$ (2.1)

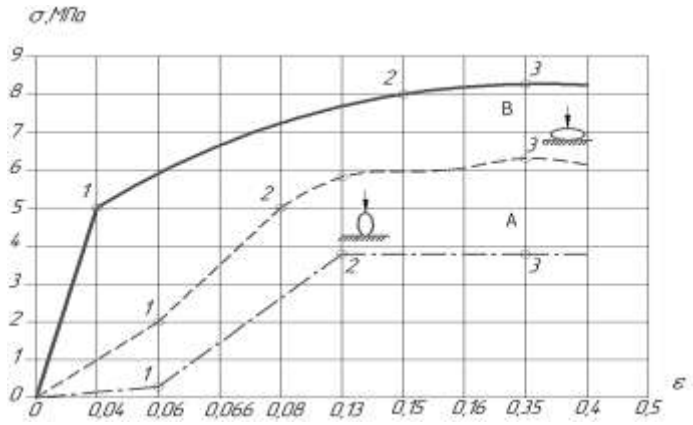
Анализируя диаграммы сжатия зерен ячменя (рис. 2.2), можно достоверно утверждать, что процесс разрушения может быть выполнен в две стадии: на участке 0–1 и частично 1–2, в зависимости от структуры зерновки, упругая деформация и усилиz растут, а на участке 2–3 - пластическая деформация – практически без увеличения усилия [14,31].

Связь между σ и ε описывается уравнением линий тренда в отрезках в виде σ = Aε + B с коэффициентом корреляции R2 = 0,866– 0,724 и может быть признана функциональной, при A = (0,637– 0,297) и B = (4,425–1.501), что позволяет судить об устойчивости процессов нагружения и разрушения во всем рабочем диапазоне ε=(0,08-0,4).

Воспользовавшись рисунком 2.1, упругую деформацию технически можно выполнить в сечении a – d вальцовой или дисковой парой различной геометрии, а пластическую окончательно с измельчением, в сечении a – d_3. Тогда коэффициент энергетической эффективности процесса, гипотетически, может быть определен по аналогии с (2.1) по соотношению:

$$\Psi_г = (cd + c_1 d_1)/2ad \ . \qquad (2.2)$$

Величина $\Psi_г$ значимо превышает величину Ψ (2.1), априори.



σ – напряжение; ε – относительная деформация; A – область осевых (продольных) деформаций разрушения; B – область поперечных деформации 0-1 – упругие деформации; 1-2 – упруго-пластические деформации; 2-3 – пластические деформации.

Рисунок 2.2 – Реализации диаграмм сжатия зерновок ячменя по С. В. Мельникову

Фаза пластического и окончательного измельчения может быть выполнена молотками со значительно меньшей рабочей скоростью $V_р$<(0,4-0,6) $V_м$, дисками или жерновами, пальцевыми, штифтовыми и иными рабочими органами, реализующими эффект П. А. Ребиндера, снижения прочности при циклических нагружениях, получивших на первой стадии макродефекты прочности.

Экспериментальное исследование раздельного процесса измелъчения предварительно деформированных вальцами зерновок порционной пальцевой дробилкой подтвердило эффект уменьшения времени окончательного измельчения на 28-30 % по сравнению с однофазным при сравнимом модуле помола.

Изложенное позволяет сделать вывод о необходимости разработки схем и конструкций ступенчатых измельчителей с выделением готового продукта (фракции) после каждой ступени, позволяющим снизить эффект повторных разрушений, появление мучной пыли и затрат энергии на процесс в целом [21,59,67,74,81 – 83].

Для решения научно-течнической задачи составлен алгоритм, который включает основные его этапы (рисунок 2.3).

В основу разработки новых энергосберегающих процессов и рабочих органов для их осуществления должны быть положены следующие принципы:

– достижение технологического результата с минимальными удельными энергетическими характеристиками;

– движение продуктового потока в рабочем пространстве, исключающем повторное и взаимное перетирание и деформацию частиц;

– сохранение достигнутой деформации путем релаксации предшествующей энергии в технологическую структуру без дополнительной деформации с учетом упруго-вязких особенностей продукта;

– возможность непрерывного выведения кондиционных фракций из потоков продукта измельчения в технологическом канале;

– согласование, в соответствии с технологическим процессом, площадей сечений приемного и выпускного каналов, подающего и модульного поясов исключающих заторы и образование пыли.

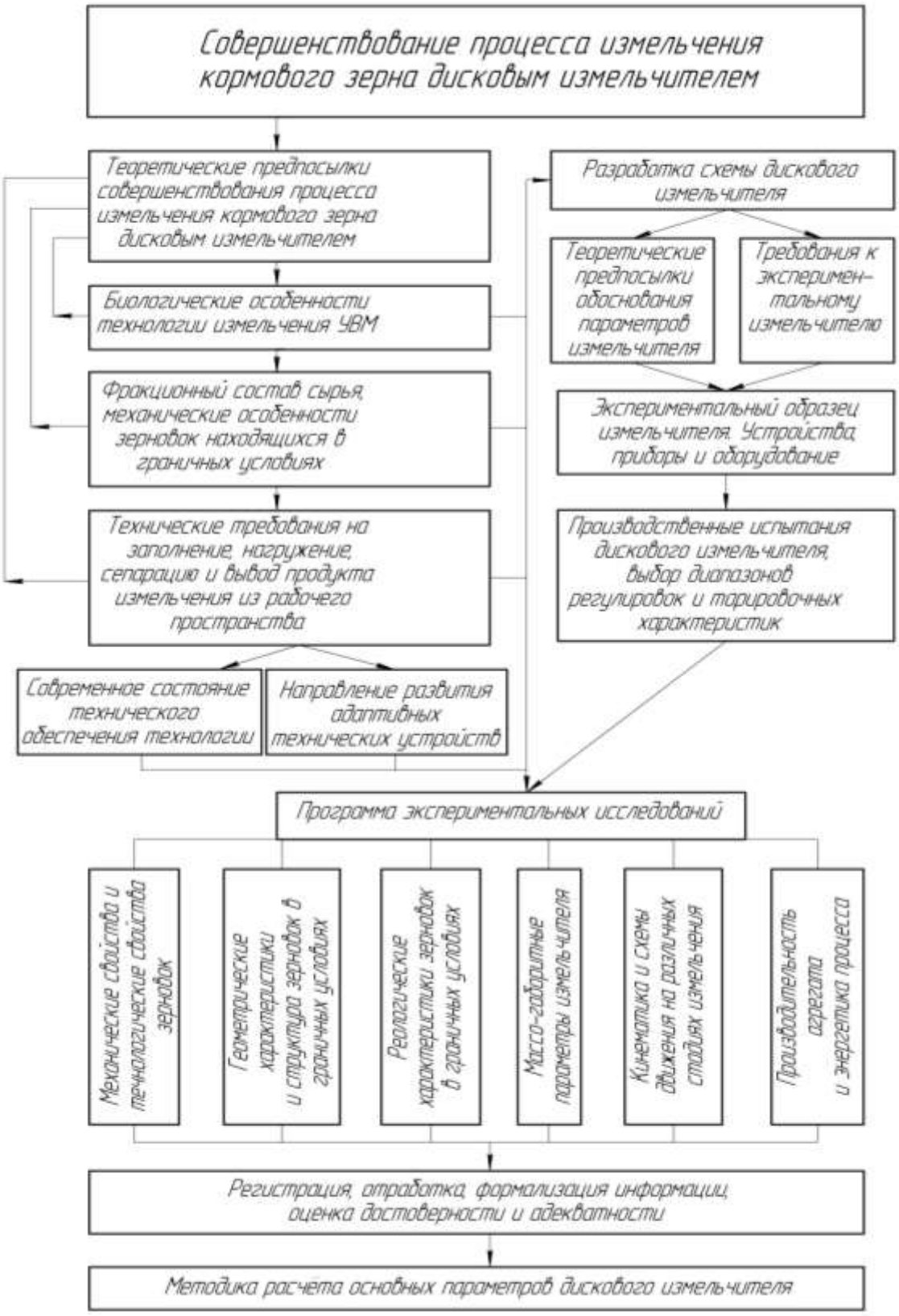


Рисунок 2.3 – Алгоритм решения научно-технической задачи.

Для описания процессов деформирования упруго-вязких материалов, деформируемых во времени, применяется упрощённый закон линейного деформирования [15,22,23].

В качестве исходного положения для рассмотрения процессов деформации зерновок кормовых культур, согласно исследованиям, проведенным ранее и нами, принимаем, что упруго-вязкие тела, подчиняются упрощенному закону линейного деформирования [22. с 43 – 46]

$$Hn\varepsilon' + E\varepsilon = \sigma + n\sigma' , \qquad (2.3)$$

где *H, E* – мгновенный и длительный модули деформации, Па; ε, ε' – относительная деформация и ее производная по времени, скорость; *σ, σ* – напряжение и его производная, Па, Па/с; *n* – время релаксации напряжений, с.

В зависимости от скорости деформации упруго-вязкие тела ведут себя по разному в отличии от упругих или вязких, пластичных. Для постоянной скорости деформации, уравнение (2.3) перепишется в виде

$$\sigma + n\sigma' = \omega tE + \omega nH , \qquad (2.4)$$

где ω – скорость относительной деформации, $с^{-1}$.

Решением (2.4) относительно σ с начальным условием $\sigma_0=0$ является

$$\sigma = \omega\left[Et + n(H - E)(1 - e^{-\frac{t}{n}}) \right]. \qquad (2.5)$$

Если зерновка или ее частицы в процессе деформации поступают в измельчающее пространство с некоторым приобретенным напряжением $\sigma_0\neq0$, двигаясь в рабочем пространстве измельчителя, то решением уравнения (2.4), по аналогии с (2.5) будет

$$\sigma = \omega\left[Et + n(H - E)(1 - e^{-\frac{t}{n}}) \right] + \sigma_0 e^{-\frac{t}{n}} . \qquad (2.6)$$

При постоянной величине σ=const решение уравнения (2.3) относительно ε имеет вид

$$\varepsilon = ce^{-\frac{Et}{Hn}} + \frac{\sigma}{E}. \qquad (2.7)$$

Приняв за начальное условие деформации $\varepsilon_0=\sigma/H$; $c = \sigma\left(\frac{1}{H} - \frac{1}{E}\right)$, получим решение

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \sigma\left(\frac{1}{H} - \frac{1}{E}\right)e^{-\frac{Et}{Hn}}, \qquad (2.8)$$

из которого следует, что при достаточно большом t и отрицательном значении величины в скобках, так как H всегда больше E, ε по уравнению (2.8) стремится к величине σ/E (рис 2.3)

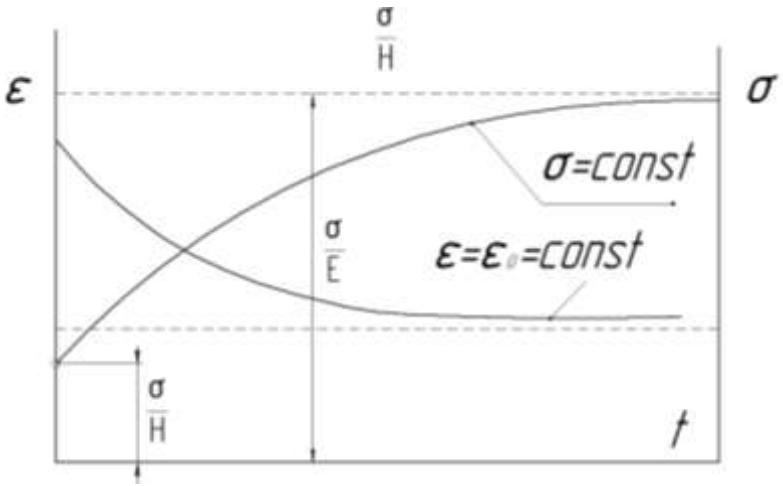


Рисунок 2.3 – Графики изменения напряжения и деформации УВС по зависимостям σ=const, ε=const

Приведенные зависимости для σ и ε показывают, что для заданного закона изменения деформации ε=ωt можно получить закон изменения напряжений и наоборот.

Для большого промежутка времени σ (2.5) будет стремиться к значению

$$\sigma_\infty = E\omega t + n(H - E)\omega, \qquad (2.9)$$

в котором $n(H-E)\omega$ представляет собой опережение напряжения по сравнению с его статической величиной $E\omega t$, являющееся функцией скорости деформации ω (рис 2.4).

Полупрямая $\sigma=H\omega t$ – соответствует динамическому режиму, касательная к графику напряжений – установившей скорости деформации и

нарастания напряжения. Тогда ординату точки А, пересечения полупрямой $\sigma = H\omega t$ и касательной, можно считать полным динамическим напряжением, а ординату точки С пересечения графика роста напряжений от σ=0 с начала координат, напряжением, соответствующему статическому режиму.

Проведя из А полупрямую параллельную оси абсцисс до пересечения с полупрямой статического нагружения $\sigma = E\omega t$, получим точку В, абсцисса которой соответствует времени достижения $\sigma_д$ при статическом режиме деформации. Тогда отношение $\sigma_д/\sigma_c$, равно как $t_д/t_c$, с некоторыми допущениями, можно считать коэффициентом динамичности.

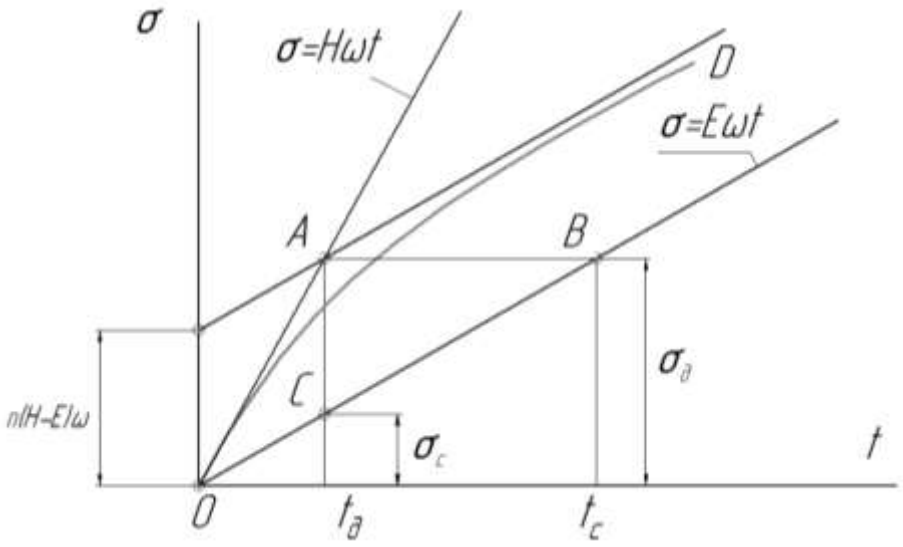
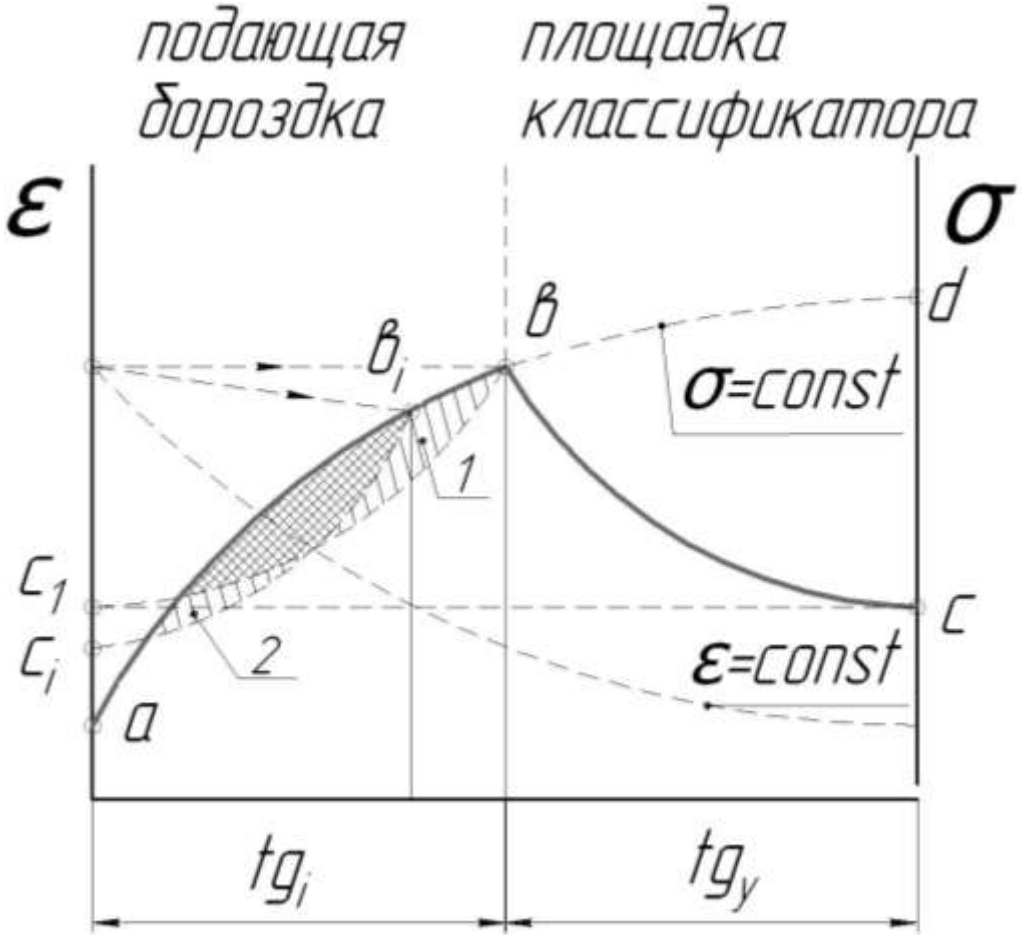


Рисунок 2.4 – График изменения напряжения в функции времени при динамическом и статическом нагружении

Время ударов молотков дробилок по зерну, по данным исследований, составляет от (2,2 до 3,1) $\times 10^{-5}$с., при рабочей скорости концов молотков (55–75) м/с, ударно-центробежных измельчителей (3,4–4,1)$\times 10^{-5}$с, что соответствует динамическому режиму нагружения. При этом величина динамического коэффициента k_d варьирует в пределах (2–2,5) и разрушение упруго-вязких структур зерновок происходит с превышением их реальной прочности в разы приводя к переизмельчению, образованию мучной пыли и значительному перерасходу энергии, упруго-вязкие особенности зерновок при таких режимах игнорируются [15,21 – 23].

Исследования, выполненные в процессе уплотнения стебельчатых монолитов, с учетом особенностей поведения упруго-вязких материалов (УВМ) при σ и ε равных постоянным значениям (рис 2.3) позволяют количественно оценить возможность наращивания дефектов прочности в структуре зерновок и их частей увеличением времени нагружения и удержанием достигнутой деформации [62,63].

Графически (рис 2.5) процесс наращивания дефектов прочности, за счет накопления энергии в упруго-вязкой структуре зерновок, с учетом (2.6, 2.8) и (рис 2.3) может быть представлен в виде.



1,2 – петли «гистерезиса»; *a-d* – σ=*const*; *b-c* – ε=*const*

Рисунок 2.5 – Графики изменения параметров состояния зерновки (частиц) при деформации σ=*const* и ε=*const*

При этом, достигнутая величина деформации в точке *b* сохраняется, а напряжение снижается за счет рассеивания энергии в УВМ зерновки на площадках релаксации (классификаторах) (рис 2.5).

Зерновки или их части могут находиться на дне подающих бороздок в течении *tg* и по достижении площадок релаксации оставаться в состоянии полученной в бороздке деформации до попадания в очередную подающую бороздку. Оказавшись в свободном состоянии частица, под действием центробежной силы перемещается к периферии диска, заклинивается уже в точке b_i (R_i) затем снова перемещается на площадку релаксации и т.д. до выхода в модульный пояс.

Перенос дуги *bc* в положение bc_1 (рис 2.5) позволяет установить наличие между графиками функций $\sigma=const$ и $\varepsilon=const$ петель «гистерезиса» (1 и 2), что свидетельствует о рассеивании энергии деформации в продукте измельчения, за время нахождения его в режиме $\varepsilon=const$.

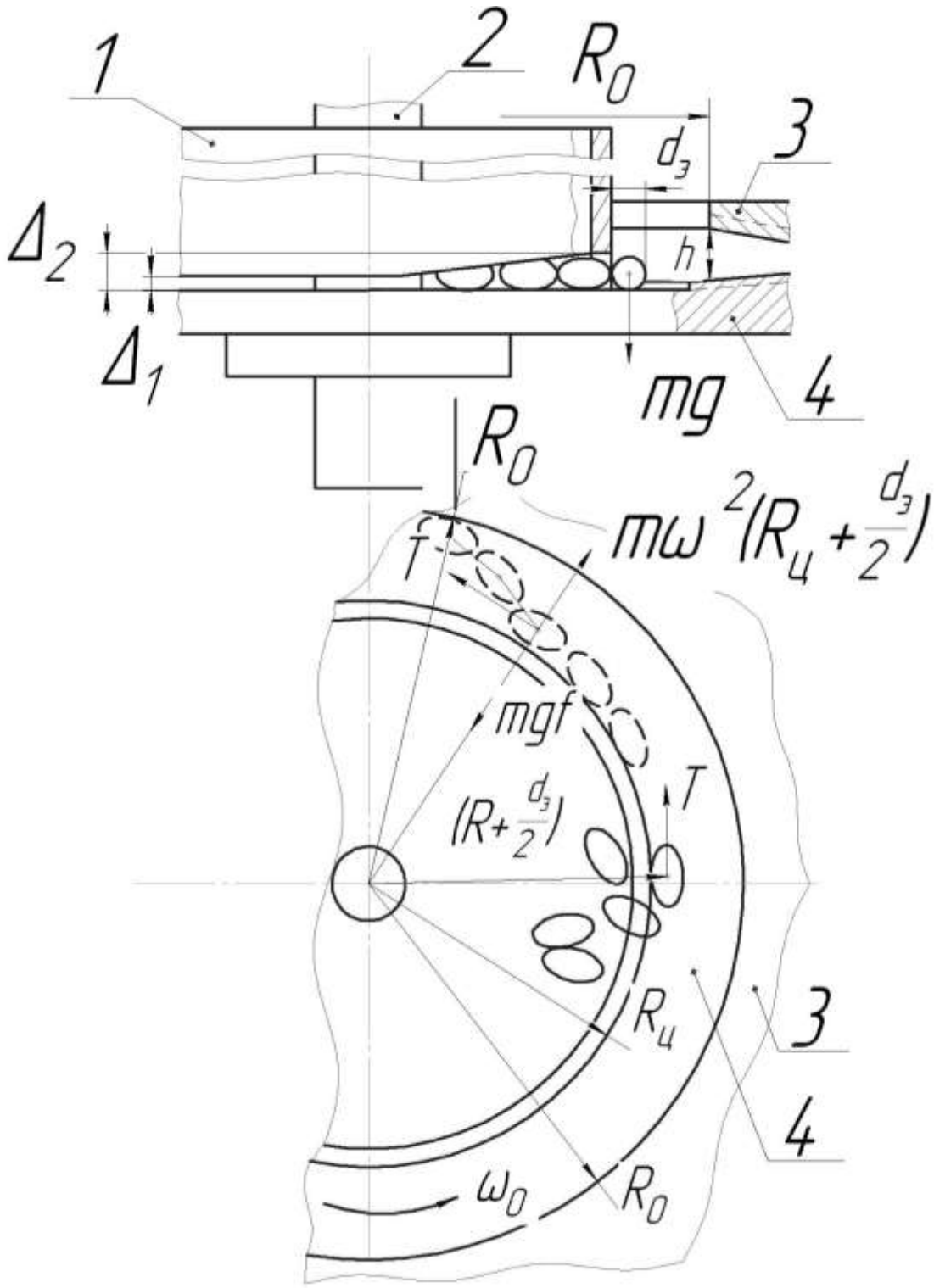
Частицы малых размеров, отделившиеся от зерновок в бороздках или на площадках релаксации под действием центробежных сил перемещаются к периферии диска, попадают в модульный пояс и доизмельчаются до заданных регулировкой размеров.

Гуриненко Л.А. получена зависимость для определения площади петли гистерезиса для единичного цикла нагружения, когда могут быть измерены его временные параметры [62].

Применительно к разрушению зерновок, нас интересует возможность увеличения времени нахождения продукта в рабочем пространстве, подвергаясь многократным воздействием с постепенным нарастанием дефектов прочности без динамических эффектов.

Такой режим работы измельчителя предполагает равномерную, включая позерновую или слоем зерен равным $d_э$ по типу вальцевых рабочих органов, распределяющую подачу зерна в приемный пояс дисковой пары

Подача зерна в приемный пояс и его распределение по приемным бороздкам подводящего пояса осуществляется дозатором-распределителем (рисунок 2.6), так – как согласование подачи и пропускной способности является условием устойчивой работы измельчителей [95,96].



1 – цилиндр дозатора-распределителя; 2 – вал приводной; 3 – диск неподвижный; 4 – диск подвижный.

Рисунок 2.6 – Схема работы дозатора-распределителя

Зерно самотеком поступает в цилиндр дозатора-распределителя и, заполнив его, запирает питающий лоток бункера. После включения

измельчителя в работу нижний диск начинает вращаться и зерно, через дозирующие вырезы на нижнем торце цилиндра выкатывается, если $\Delta_2 > d_э$ за его пределы в приемный пояс измельчителя.

На зерновку у внешней поверхности цилиндра (рис 2.6) действует нормальная сила N равная mg и сила трения T, равная mgf. Зерновка начинает равномерно-ускоренное движение у внешней поверхности цилиндра с ускорением, равным gf, в котором f – кинематический коэффициент трения зерновки по диску. Тогда скорость зерновки V увеличивается по зависимости

$$V = g \cdot f \cdot t \,, \tag{2.10}$$

по мере прохождения пути S по внешней поверхности цилиндра, равного

$$S = g \cdot f \cdot \frac{t^2}{2} \tag{2.11}$$

По мере разгона зерновки, двигающейся по дуге радиуса равного,

$$R = R_ц + \frac{d_э}{2} \tag{2.12}$$

начинает расти центробежная сила $F_ц$, равная

$$F_ц = m \cdot \omega_i^2 \cdot (R_ц + \frac{d_э}{2}) \,, \tag{2.13}$$

и при условии, когда

$$F_ц > T, \tag{2.14}$$

Здесь $T = mgf$ – сила трения зерновки о подвижный диск, зерновка начинает двигаться и в радиальном направлении.

Совместное решение (2.13) и (2.14), позволяет определить величину угловой скорости зерновки в относительном движении по условию (2.14).

$$m \cdot \omega^2 (R_ц + \frac{d_ц}{2}) > m \cdot g \cdot f \,, \tag{2.15}$$

откуда

$$\omega > \sqrt{g \cdot \frac{f}{R_ц + d_э / 2}} \,. \tag{2.16}$$

Здесь ω – функция переносной скорости (2.10) вращательного движения зерновок с подвижным диском

$$\omega = g \cdot f \cdot \frac{t}{R_ц + d_э / 2}, \qquad (2.17)$$

что позволяет, с учетом условия (2.14), определить время начала радиального движения и подачи зерна в приемный пояс измельчителя

$$g \cdot f \cdot \frac{t}{R_ц + d_э / 2} > \sqrt{g \cdot \frac{f}{R_ц + d_э / 2}} \qquad (2.18)$$

Решив (2.16) относительно t, с учетом (2.17), получим

$$t > \sqrt{\frac{R_ц + d_э / 2}{g \cdot f}} \qquad (2.19)$$

Тогда длина дуги внешней поверхности цилиндра, необходимая для разгона зерновки и начала радиального движения в приемный пояс дробилки, равная *S* (2.11), составит

$$S > \frac{2R_ц + d_э}{4} \qquad (2.20)$$

Далее переносная скорость зерновки будет увеличиваться при постоянном ускорении *fg* (2.10), а скорость относительного движения, в направлении приемного пояса дисковой пары, при центробежном ускорении, нарастающем пропорционально удалению зерновки от наружной поверхности цилиндра до R_0 границы приемного пояса будет возрастать по мере ее удаления от центра диска с ускорением.

$$a_r = \omega^2 \left(R_ц + \frac{d_э}{2} + \frac{a_i t_i^2}{2} \right). \qquad (2.21)$$

Зерновка достигнет границы приемного пояса R_0 с максимальным центробежным ускорением равным

$$a_{\max} = \omega^2 R_0 . \qquad (2.22)$$

Тогда среднее значение ускорения, с достаточной для технологических расчетов точностью , можно определить по зависимости. Зная конечную величину приращения радиуса радиального движения зерновки ΔR, равную (рис 2.6)

$$\Delta R = R_0 - R_ц - d_э/2, \qquad (2.23)$$

Зная радиальную составляющую пути разгона ΔR определим время, необходимое для прохождения этого пути, пологая, что движение равноускоренное, по зависимости

$$\Delta R = \frac{a_{ср} \cdot t^2}{2}. \qquad (2.24)$$

После подстановки составляющих в (2.23) и решения относительно t, имеем

$$t = \sqrt{\frac{4\left(R_0 - R_ц - d_э/2\right)}{\omega^2\left(R_0 + R_ц + d_э/2\right)}}. \qquad (2.25)$$

С учетом (2.21 и 2.25) скорость $V_{пр}$ поступления зерновок в приемный пояс дисковой пары составит

$$V_{пр} = a_{ср}t = \omega^2\left(\frac{R_0 + R_ц + d_э/2}{2}\right)\sqrt{\frac{4\cdot\left(R_0 - R_ц - d_э/2\right)}{\omega^2\left(R_0 + R_ц + d_э/2\right)}}. \qquad (2.26)$$

Здесь $$a_{ср} = \frac{\omega^2 R_ц + d_э/2 + \omega^2 R_0}{2}.$$

После некоторых преобразований (2.26), окончательно имеем

$$V_{пр} = \omega\left(\frac{2R_0 + 2R_ц + d_э}{2}\right)\sqrt{\frac{2R_0 - 2R_ц - d_э}{2R_0 + 2R_ц + d_э}}$$

Отсутствие заторов на входе в приемный пояс можно охарактеризовать поступлением зерна слоем равным $d_э$. Тогда максимальная подача его в междисковое пространство составит

$$Q_{\max} = 2\pi \cdot R_0 \cdot d_э \cdot V_{пр} \cdot \Psi \cdot \rho, \qquad (2.27)$$

где ρ– плотность зерновки, кг/м^3; Ψ –коэффициент заполнения слоя.

Максимальная позерновая подача обеспечивается геометрическими параметрами дозирующего устройства – его радиусом $R_ц$, дугой разгона S, высотой Δ_2 и длиной $l_в$ вырезов, а также зазором между торцом цилиндра и диском Δ_1.(рис 2.6).

Для однозерновой подачи Δ_1 меньше $d_э$ зерновки соответствующей культуры, а Δ_2 – равно максимальной ее величине с учетом коэффициента вариации. Угол наклона выреза к плоскости диска должен обеспечивать расположение не менее 3-х зерен на выходе из цилиндра, что снижает вероятность образования замковой ситуации [86].

Дальнейшее увеличение Δ_1 – зазора обеспечивает раздельно – поточную подачу, ($\Delta_1<d_{min}$) и ($\Delta_1>d_{max}$) – секторную, включая и максимальную контролируемую по появлению мучки в продукте измельчения (рис 2.7).

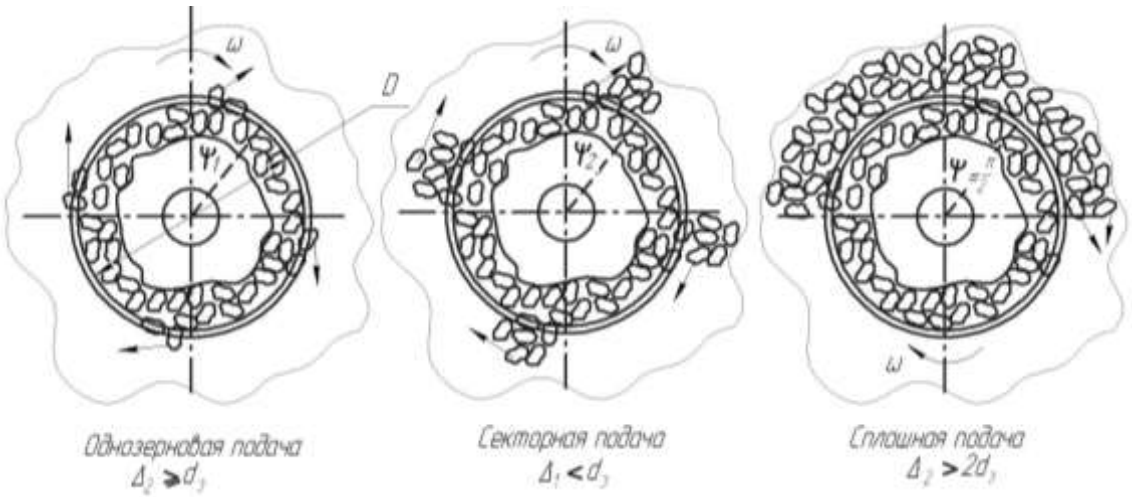


Рисунок 2.7 – Схема режимов работы дозирующего-распределительного устройства

Число вырезов и дуг разгона, в зависимости от диаметра дозирующего цилиндра, находим по отношению

$$k = \frac{2\pi \cdot R_ц}{S + l_в}, \qquad (2.28)$$

где $l_в>3l_{max}$, а l_{max}–максимальная варицонная длина зерновки.

Полученное значение k округляется в меньшую сторону, а S и $l_в$ корректируется в большую, так как способствуют улучшению процесса дозирования и доставки зерна в приемный пояс [84].

Работа дозатора-распределителя позволяет исключить заторы в междисковом пространстве дискового измельчителя кормового зерна.

2.2 Геометрия и кинематика рабочей поверхности дисков измельчителя

Перевести динамический режим деформации зерна $\sigma=H\omega t$ (рис 2.4) в статический $\sigma=E\omega t$ позволяют рабочие органы дискового измельчителя, представляющие собой пару дисков (рис 2.11), имеющих оригинальную рабочую поверхность [21,49,50,87].

Исследования рабочего процесса дискового измельчителя кормового зерна проводились на экспериментальном образце, который был изготовлен для проверки работоспособности его на различных зерновых кормах.

Дисковый измельчитель кормового зерна (рис. 2.8), изготовленный по патенту РФ № 2511291, содержит основание-корпус 1, жёстко установленная на нем приемная воронка 2, а также верхняя 3 и нижняя 4 опоры вертикального вала (рис 2.9) 5, первая 6 и вторая 7 дисковые пары, расположенные параллельно друг другу на вертикальном валу с тремя поясами деформации (рис. 2.10), конусообразную решётку сепаратора 8, наклонный желоб 9, регулирующее устройство 10, привод 11, скатные доски 12.

Дисковый измельчитель кормового зерна работает следующим образом.

Измельчаемый продукт из приемной воронки 2 под действием силы тяжести через цилиндрическое отверстие в неподвижном диске 17 поступает на перую пару дисков 6 расположенную перпендикулярно оси вращения вертикального вала 5. Зерно попадает в приёмный пояс 14 (рис 2.10), переходя на подающий пояс 15 подвергается предварительной деформации и окончательно разрушается в модульном поясе 16. Затем измельченный продукт попадает на конусообразную решетку сепаратора 8 и проходя через нее отводится по наклонному желобу 9. Крупная фракция которая не прошла через конусообразную решетку сепаратора 8, скатывается по нему сходом и попадает на вторую пару дисков 7, и таким же образом доизмельчается до

размеров задаваемых регулировкой. Аналогичным образом готовый продукт отводится по наклонному желобу 12.

Таким образом дисковый измельчитель кормового зерна способен за один цикл произвести две фракции заданных модулей помола

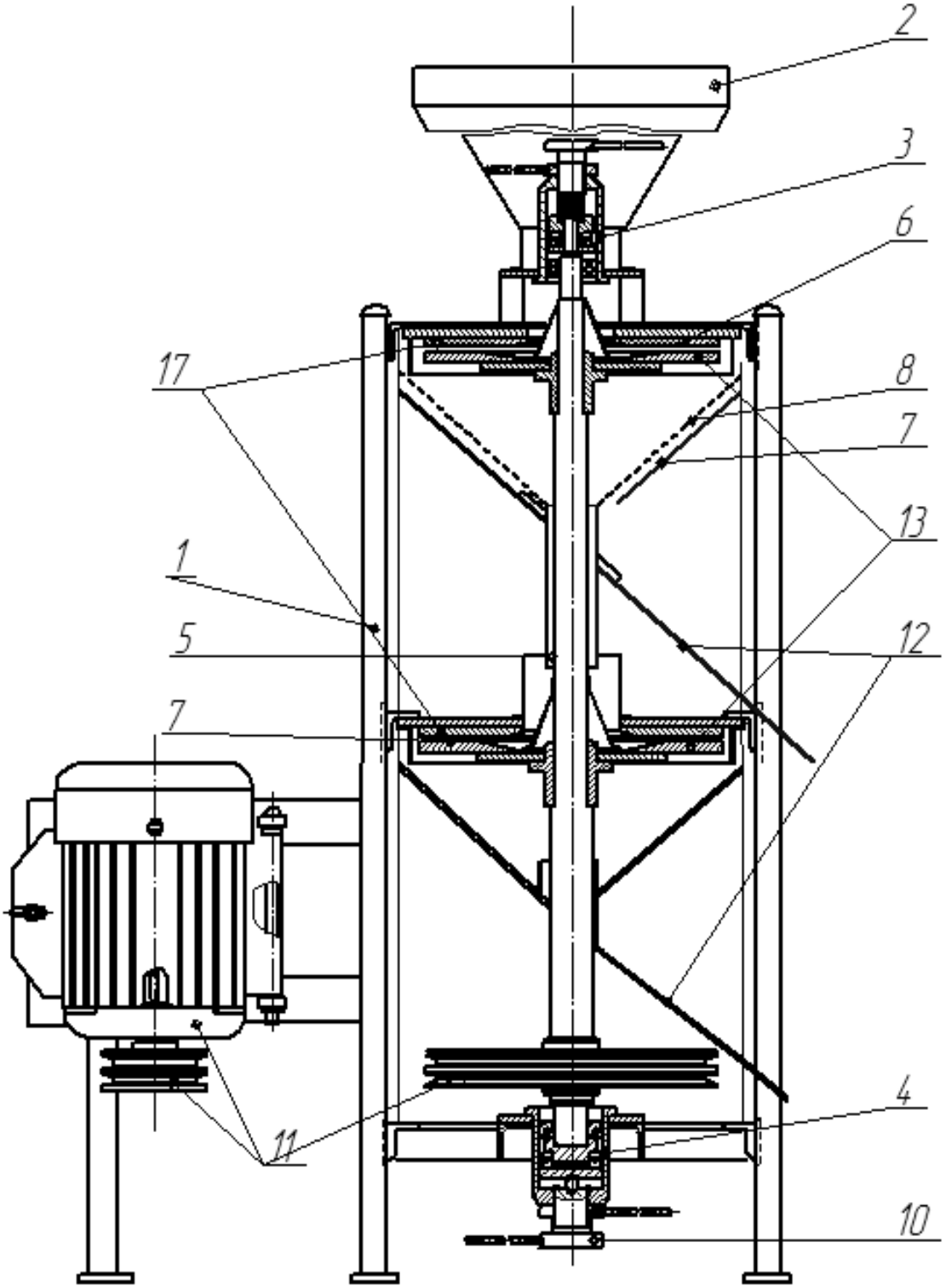
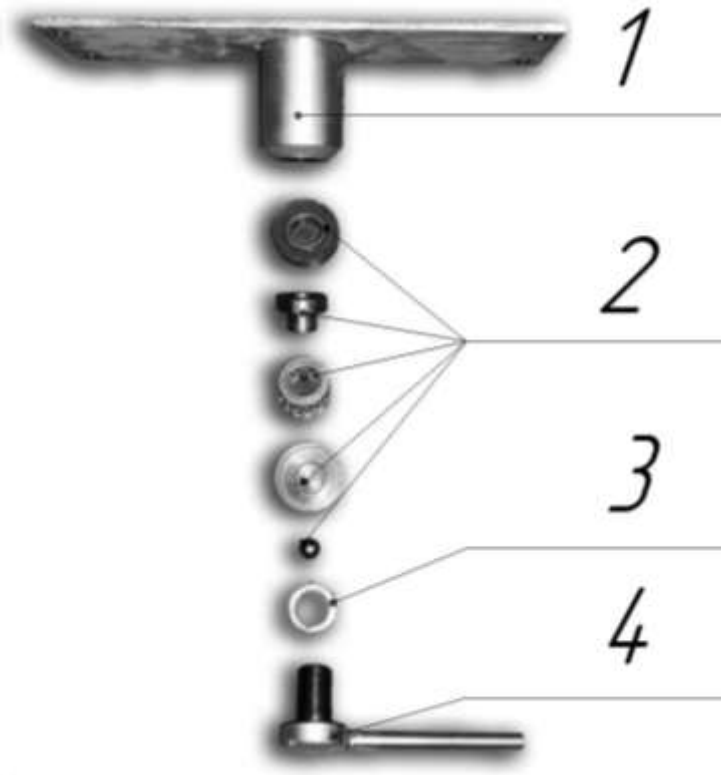
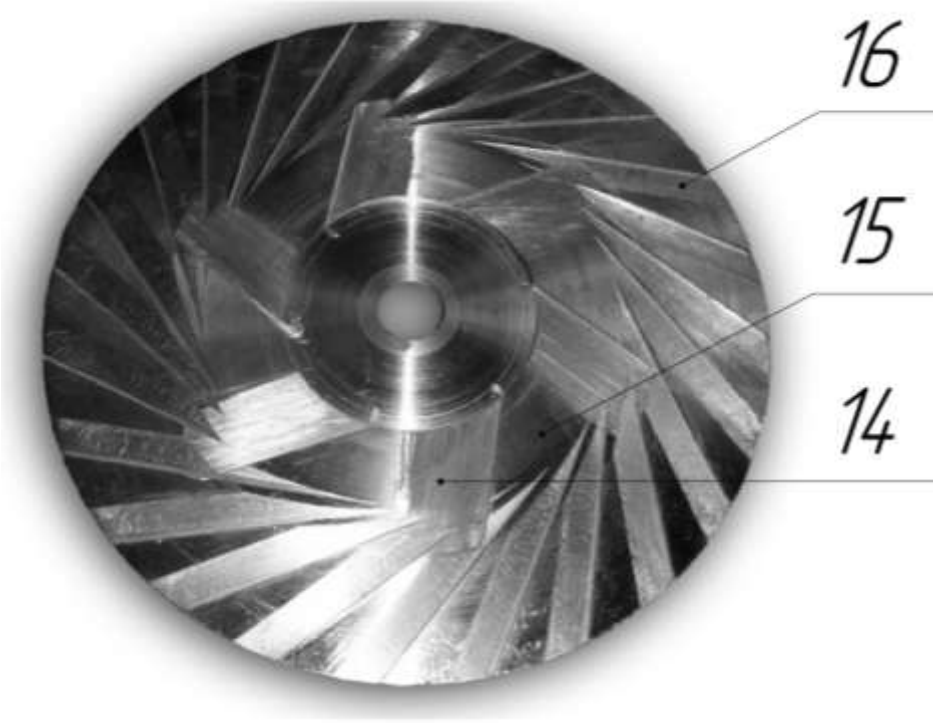


Рисунок 2.8 – Схема дискового измельчителя кормового зерна



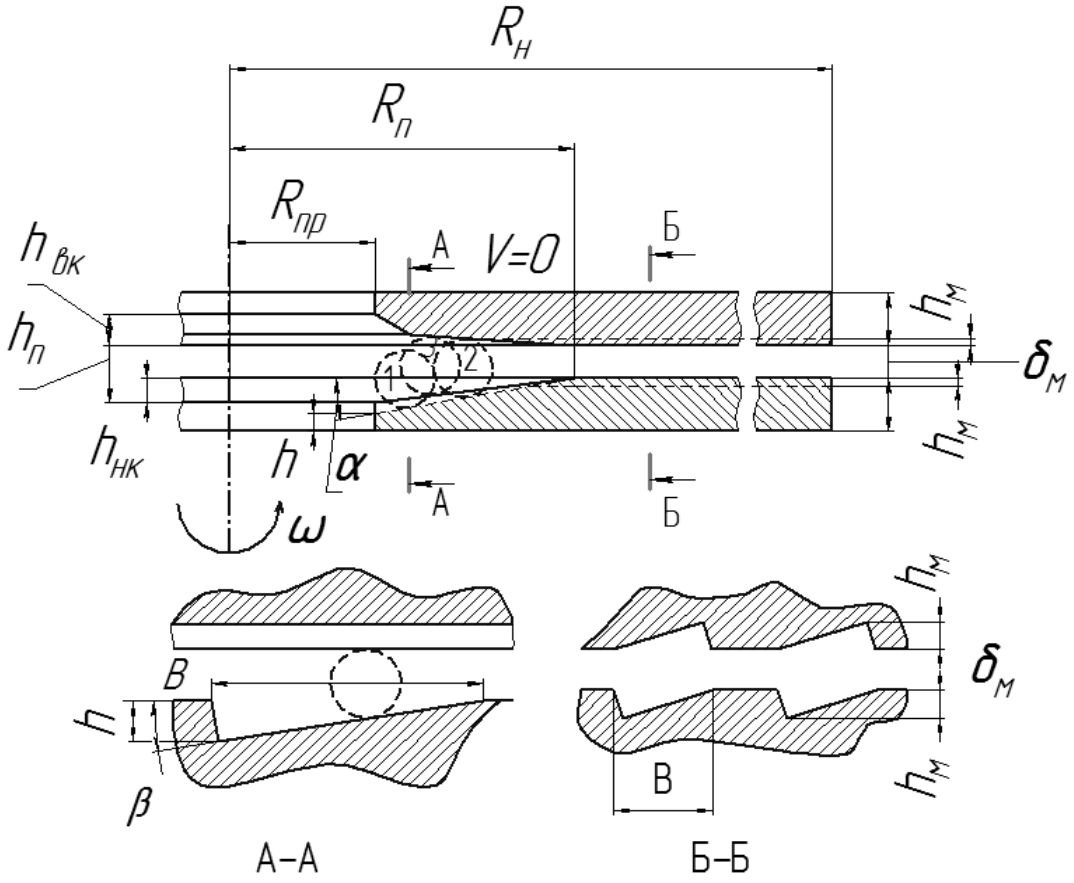
1 – стакан регулирующего устройства; 2 – радиально-упорный узел;
3 – контр гайка; 4 – регулирующий винт.

Рисунок 2.9 – Регулирующее устройство



14 – приёмный пояс; 15 – подающий пояс; 16 – модульный пояс.
Рисунок 2.10 – Диск измельчителя

Рабочее пространство измельчителя образуется поверхностями двух дисков, верхним неподвижным и нижним подвижным, установленным на вертикальном валу. Геометрические элементы поверхностей дисков образуют приемный пояс шириной ($R_п$-$R_{пр}$) и модульный – шириной ($R_н$-$R_п$). Степень измельчения регулируется зазором $\delta_м$ между площадками релаксации (рис. 2.11) модульного пояса.



$h_{вк}$ – высота верхнего приемного конуса; $h_{нк}$ – высота нижнего приемного конуса; 1;2 – положение частиц в подающей бороздке; 3 – положение частиц в поясе релаксации; А-А – профиль бороздок подающего пояса; Б-Б – профиль бороздок модульного пояса

Рисунок 2.11 – Радиальное сечение дисковой пары измельчителя

Площадь сечения приемного канала дисковой пары F_n включает (рисунок 2.11) площадь кольца высотой $h_п$ и общую площадь подающих бороздок подвижного диска шириной B и глубиной h.

$$F_n = 2\pi R_{np} h_n + Bhz/2. \qquad (2.29)$$

Здесь z – число бороздок, $R_{пр}$ – радиус приемного колодца, м.

Площадь сечения выпускного канала на расстоянии $R_{пр}$ от центра вращения диска составляет

$$F_n = 2R_н\delta_м + вh_м z_м/2\,, \qquad (2.30)$$

где: $\delta_м$ – зазор между неподвижным и подвижным дисками, соответствующий заданному модулю помола, м; $z_м$ – число модульных бороздок на обоих дисках;$R_н$ – радиус дисков, м.

Зерновка, попавшая на входе в положение 1 (дно бороздки), под действием центробежной силы перемещаетсяся в положение 2 и заклинивается в поясе деформации. Зерновка 3 в поясе удержания деформации перекатывается в положение дна следующей бороздки и так же отбрасывается от центра вращения по мере разрушения в новое положение заклинивания, прокатывания и деформации со значительно меньшим зазором.

Для этого необходимо выполнить условие движения зерен и отделившихся частиц по наклонной плоскости вверх (рисунок 2.12) в приемный канал без перекатывания [93].

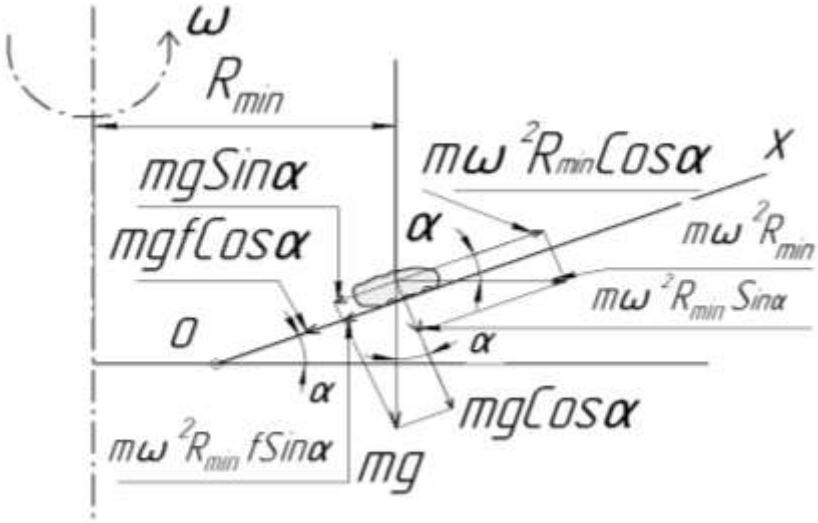


Рисунок 2.12 – К обоснованию геометрии и кинематики приемного пояса дисковой пары

Условие движения частицы вверх по вращающейся наклонной плоскости без учёта переносного движения в общем виде запишется [93]:

$$\mathrm{m}\omega^2 R_{\min} Cos\alpha > mgSin2 + mgfCos\alpha + m\omega^2 R_{\min} fSin\alpha\,. \qquad (2.31)$$

После упрощения, имеем:

$$\omega_{\alpha} > \sqrt{\frac{g(Sin\alpha + fCos\alpha)}{R_{\min}(Cos\alpha - fSin\alpha)}}. \qquad (2.32)$$

Здесь f – коэффициент трения продукта о диск; α – угол подъема подающей бороздки; R_{min} – радиус приемного отверстия.

Из соотношения (2.32) следует, что существует «α» когда $\omega \to \infty$ – транспортирование продукта по рабочему зазору дисков отсутствует. Тогда сам угол достаточно выбирать из геометрических соображений построения поясов транспортирования, деформации, сепарирования и релаксации при минимальном значении ω, удовлетворяющей условию (2.32) .

Входное и выходное сечения междискового пространства также должны быть согласованы таким образом, чтобы подача в произвольном сечении междискового пространства оставалась постоянной, или незначительно возрастала, а пояс удержания деформации (релаксации) расширялся с постоянным градиентом для сепарации потока и распределения его частиц в соответствующих их размерам пространствах по условию [94].

$$F_n V_n \rho_n \Psi_n < F_в V_в \rho_i \Psi_в, \qquad (2.30)$$

в котором: V_n, $V_в$ – соответственно скорости входа и выхода продукта, м/с; ρ_n, ρ_i – плотность исходного и измельченного продукта, кг/м^3; $\Psi_n, \Psi_в$ – коэффициенты заполнения впускного и выпускного сечений.

Чередование зон деформации, удержания и переходов между ними должно происходить в режиме постепенного ступенчатого нарастания дефектов прочности, не вызывающих динамических сопротивлений вязкой составляющей зерновок (рисунок 2.13).

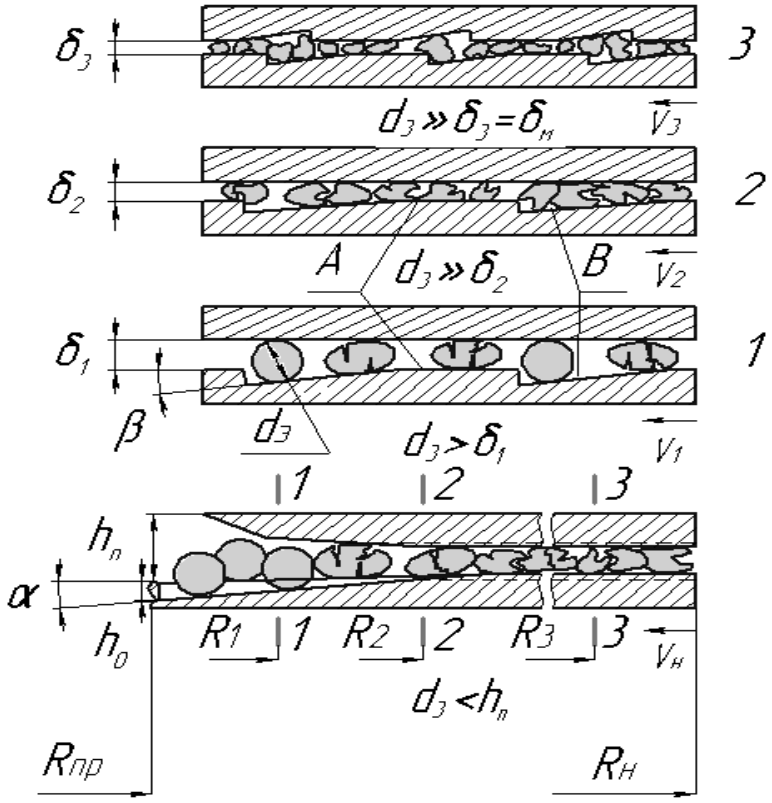


Рисунок 2.13 – Концентрические сечения междискового пространства

В поясах деформации «*B*» абсолютная скорость ее нарастания равна

$$V_{\delta к} = \omega R_i Sin\beta \,, \tag{2.34}$$

а максимальное значение абсолютной деформации при выходе частицы в пояс ее удержания *A* (релаксации) будет равно глубине бороздки, соответствующей ее удалению от центра диска

$$\delta_i = h_0 - (R_{под} - R_i)Sin\alpha \,. \tag{2.35}$$

Здесь R_i – радиус концентрической окружности, на котором находится зерновка или ее частицы; α и β – соответственно углы подъема поверхности подающего пояса и дна бороздок.

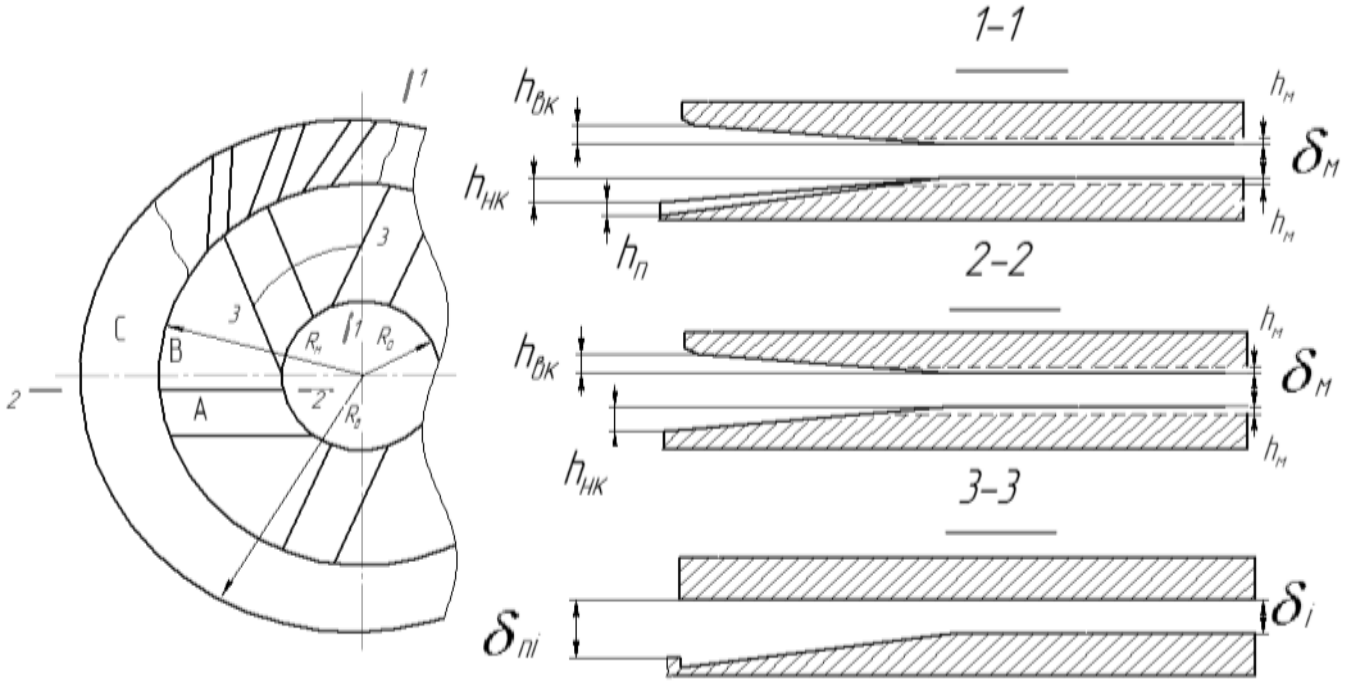
Величина абсолютной деформации зерновок от вхождения в приемный пояс до входа в модульный должна обеспечивать их предварительное разрушение на частицы, приведенный диаметр которых менее ($\delta_м$+$2h_м$) (рисунок 2.11). Тогда в модульном поясе происходит выравнивание размеров частичек до величины $\delta_м$. Частицы размером $d_{iэ} \le \delta_м$

центробежными силами выводятся из пояса выравнивания, попадают на решетный сепаратор и выводятся проходом из продуктового потока.

Частицы большего диаметра $d_i > d_м$ сходят с плоскости решетного сепаратора и направляются на вторую ступень доизмельчения, зазор между дисками которой $\delta_2 = \delta_м - h_м$. При этом время от выхода частиц из первой ступени до входа во вторую должно быть меньше времени восстановления деформаций предразрушения, полученных в первой ступени.

Рабочие органы ступенчатого измельчителя представляют собой пару дисков (рис 2.14), один из которых (верхний) неподвижный, а нижний вращается на вертикальном валу.

На рабочей поверхности нижнего диска (рис. 2.14) имеются подающие бороздки А, площадки релаксации В и модульный пояс С, обеспечивающие циклическое воздействие на зерновку от вхождения в рабочее пространство до полного измельчения и выхода из него.



R_d, $R_м$, R_0 – радиусы, соответственно, диска, модульного пояса и приёмного окна; А – подающая бороздка; и В – площадка релаксации классификатора (подающий пояс); С – модульный пояс, $h_{вк}$–высота конуса верхнего диска; $h_{нк}$–высота нижнего конуса;

Рисунок 2.14 — Элементы рабочей поверхности дисковой пары нижнего подвижного и верхнего неподвижного

Апприори, согласно теории измельчения (рис 2.15), размеры горизонтальных проекций участков диска регламентируются степенью измельчения и для равных переходов продуктов находятся в соотношении $1:\lambda:\lambda^2$ и так далее, если таких переходов более двух [14,31].

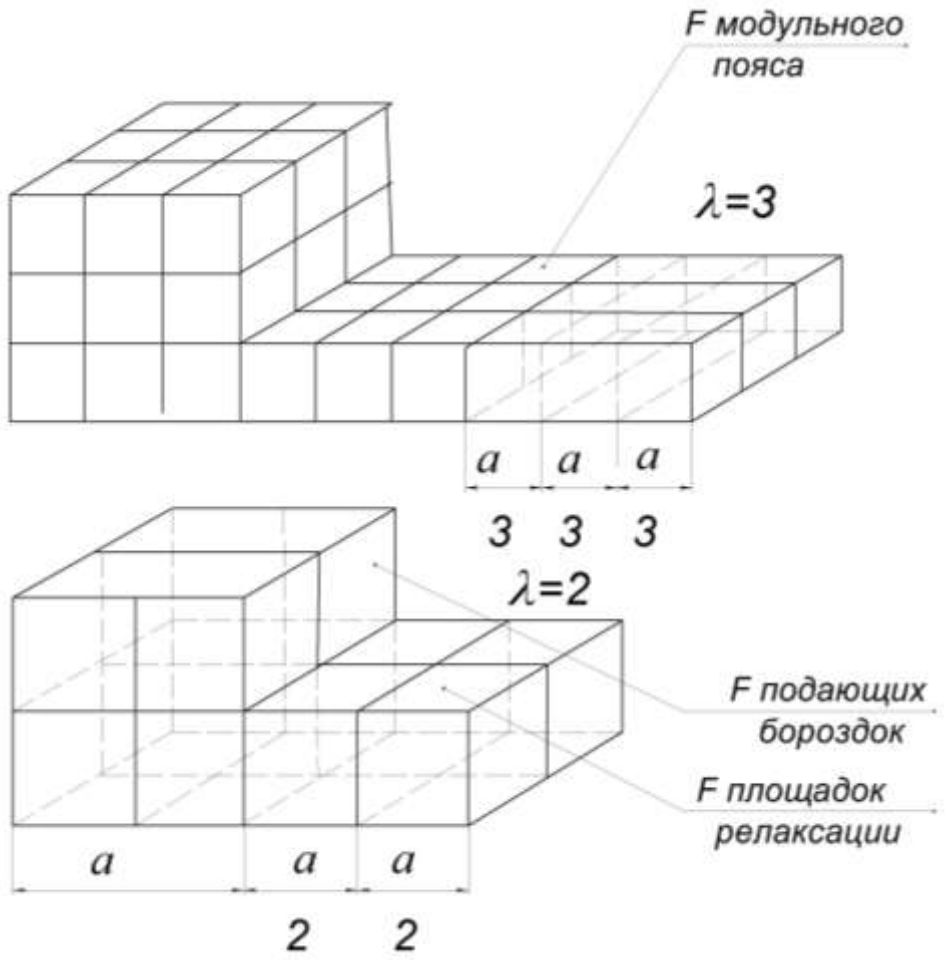


Рисунок 2.15 – К обоснованию геометрии рабочего пространства дисков

Тогда площади бороздок и классификаторов подающего пояса, определяются по зависимости

$$F_A^{б} = \frac{\pi\left(R_M^2 - R_0^2\right)}{\left(\lambda+1\right)};\ F_B^{к} = \frac{\pi\left(R_M^2 - R_0^2\right)\lambda}{\left(\lambda+1\right)}. \qquad (2.36)$$

Площадь F_c поверхности измельчающего пояса – модульного кольца составит соответственно

$$F_c = \left(F_A + F_B\right)\lambda. \qquad (2.37)$$

Тогда наружный диаметр диска, соответствующий размерам подающего пояса, определится из равенства (2.37) в развернутом виде с учётом (2.36)

$$R = \sqrt{R_M^2 (\lambda + 1) - \lambda R_0}\ , \qquad (2.38)$$

для произвольного значения λ – перехода между участками и ступенями измельчения.

2.3 Энергетика процесса измельчения зерна в рабочем пространстве измельчителя.

Усилия деформаций и их результаты формируются геометрией и кинематикой поверхностей дисков, а также задаваемой регулировкой.

С учётом скорости ω относительной деформации зерновок и их частей в подающих бороздках (рис 2.14 и 2.15) от R_0 до $R_м$ и от «*а*» до «*в*» равной

$$\omega = \frac{\omega_0 R_i tg\alpha}{h_n + \delta_м}\ , \qquad (2.39)$$

где ω_0 – угловая скорость диска;

R_i – расстояние от оси вращения диска до произвольной точки на поверхности подающей бороздки;

h_n – суммарная высота приёмных конусов дисков;

α – угол подъёма дна бороздки в оксиальном сечении;

$\delta_м$ – модульный зазор между дисками.

Такая организация движения зерна и продуктов измельчения от приемного окна до модульного пояса позволяет определить напряжения в поясах.

При измельчении зерновых смесей в технологических линиях приготовления возможна смена дисков с геометрией $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$, или иными соотношениями, требуемыми потребителем.

Напряжения сжатия в частицах потока, с учётом упруго-вязких свойств зерновок (2.3, 2.5) геометрии и кинематики рабочих поверхностей элементов поясов дисков 2.36 составят: для подающего пояса

$$\sigma_n = \frac{\omega_0 R_i tg\alpha}{h_n + \delta_м}\left[Et + n(H-E)(1-e^{-\frac{t}{n}}) \right]. \qquad (2.40)$$

Здесь:

H, E – мгновенный и длительный модули упругости соответственно Па; *t* – время нахождения частицы в бороздке, с;

n – время релаксации напряжений, с.

В модульном междисковом пространстве С (рис 2.14) напряжения сжатия, по аналогии с (2.40), определяются по формуле

$$\sigma_м = \frac{\omega_0 R_м tg\alpha_м}{2h_м + \delta_м}\left\{\left[Et + n(H-E)(1-e^{-\frac{t_м}{n}}) \right] + \varepsilon_0 He^{-\frac{t_м}{n}}\right\}, \qquad (2.41)$$

где ε_0 – начальная относительная деформация, полученная частицами в подающем поясе, равная

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\delta_м}{h_0}, \qquad (2.42)$$

где h_o – начальная максимально возможная высота зерновок, мм.

С учётом характера напряжений на границах бороздок и классификаторов (рис 2.16) , их размеров и коэффициентов заполнения, усилия *P* деформации сжатия потока частиц определятся зависимостями:
для бороздок

$$P_\delta = \sigma_0 \frac{\pi(R_м^2 - R_0^2)}{2(\lambda+1)}\psi_\delta; \qquad (2.43)$$

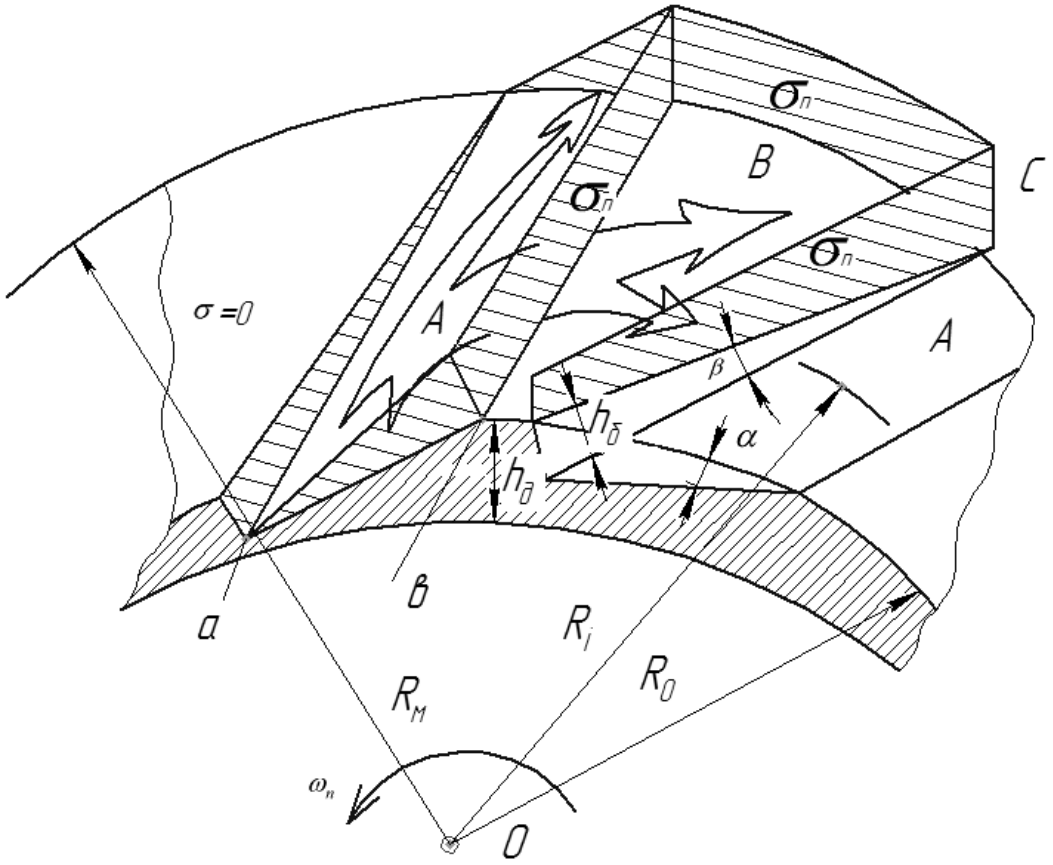
для классификаторов

$$P_к = \sigma_0 \frac{\pi(R_м^2 - R_0^2)\lambda}{(\lambda+1)}\psi_к, \qquad (2.44)$$

где ψ_δ и $\psi_к$ – соответственно коэффициенты заполнения элементов подающего пространства дисков.

По аналогии с (2.44), с учётом (2.39) и коэффициентом заполнения $\psi_м$ для модульного пространства усилие сжатия потока определится по зависимости

$$P_м = \sigma_м \pi (R_д^2 - R_м^2) \psi_м . \qquad (2.45)$$



A – бороздка подающая; *B* – классификатор; α – угол подъёма дна бороздки в оксиальном сечении, β – то же в радиальном сечении; $\sigma_п$ – эпюры напряжений на границах подающих элементов поверхности.

Рисунок 2.16 – Геометрия и эпюры напряжений на элементах подающего пояса нижнего диска

Мощность на процесс деформации и классификации продуктов измельчения в рабочем пространстве дисковой пары, без учёта транспортной и вентиляционной составляющих, определится по зависимости

$$N_д = (P_б + P_п) \frac{R_м + R_0}{2} \omega_0 f_п + P_м \frac{R_п + R_м}{2} \omega_0 f_м , \qquad (2.46)$$

где f_i – коэффициенты перекатывания продуктов измельчения по рабочим поверхностям дисков.

Вращающийся нижний диск обеспечивает циклические нагружения зерновок в бороздках, удержание деформации классификаторами, свободное, под действием центробежной силы, перемещение мелких частиц к периферии подающего пояса, не препятствует движению в аксиальном направлении защемлённых частиц больших размеров. Эти частицы, достигая края подающей бороздки, попадают в свободное пространство, защемляются, разрушаются, а продукт разрушения снова выносится в классификатор и так далее.

2.4 Выводы

– Для разработки энергосберегающего процесса измельчения кормового зерна с учетом его упруго-вязких характеристик, требуют определения мгновенного H и длительного E модулей упругости и времени релаксации n в диапазоне технологичной влажности 10-14% длительного хранения.

– Аналитические зависимости для определения геометрических, кинематических, энергетических и технологических параметров дискового измельчителя, содержание как основные факторы так и их взаимодействия, требуют достоверной экспериментальной проверки и оценки адекватности описания характеристик процесса.

– Для разработки методики инженерного расчета параметров дискового измельчителя необходимо дать энергетическую и технологическую экспертную оценку совокупности факторов, в том числе входящих в предложенные аналитические зависимости и выполнить полнофакторный и детерминированные эксперименты для назначения технологических регулировок.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

Для подтверждения выводов, сделанных из аналитических исследований процесса измельчения зерна и бобов дисковым измельчителем, получения проверки математической модели, описывающей его работу, и определение рациональных режимов функционирования была составлена программа исследований включающая:

– изучение физико-механических свойств и упруго вязких характеристик измельчаемых кормов;

– обоснование факторной модели, экспериментальное исследование работы дискового измельчителя;

– разработку и изготовление рабочей модели одноступенчатого дискового измельчителя зерна с учетом требований РД 10.19.2 - 90;

– обработку экспериментальных данных и получение регрессионных зависимостей, описывающих процесс работы дискового измельчителя и их анализ;

– определение, на основе полученных аналитических зависимостей и результатов экспериментов, рациональных кинематических, энергетических и технологических параметров работы дискового измельчителя.

3.2 Приборы и оборудование для проведения экспериментальных исследований

Исследования рабочего процесса дискового измельчителя кормового зерна проводились на экспериментальном образце, который был изготовлен для проверки работоспособности его на различных зерновых кормах. Дисковый измельчитель кормового зерна (рис. 3.1) изготовлен по патенту РФ № 2511291 и содержит: основание-корпус 1, приемную воронку 2, верхнюю 3

и нижнюю 4 опоры вертикального вала (рис 3.2) 5, первую 6 и вторую 7 дисковые пары. Нижние диски закреплены на ветрикальном валу, конусообразную решётку сепаратора 8, наклонный желоб 9, регулирующее устройство 10, привод 11, скатные доски 12.

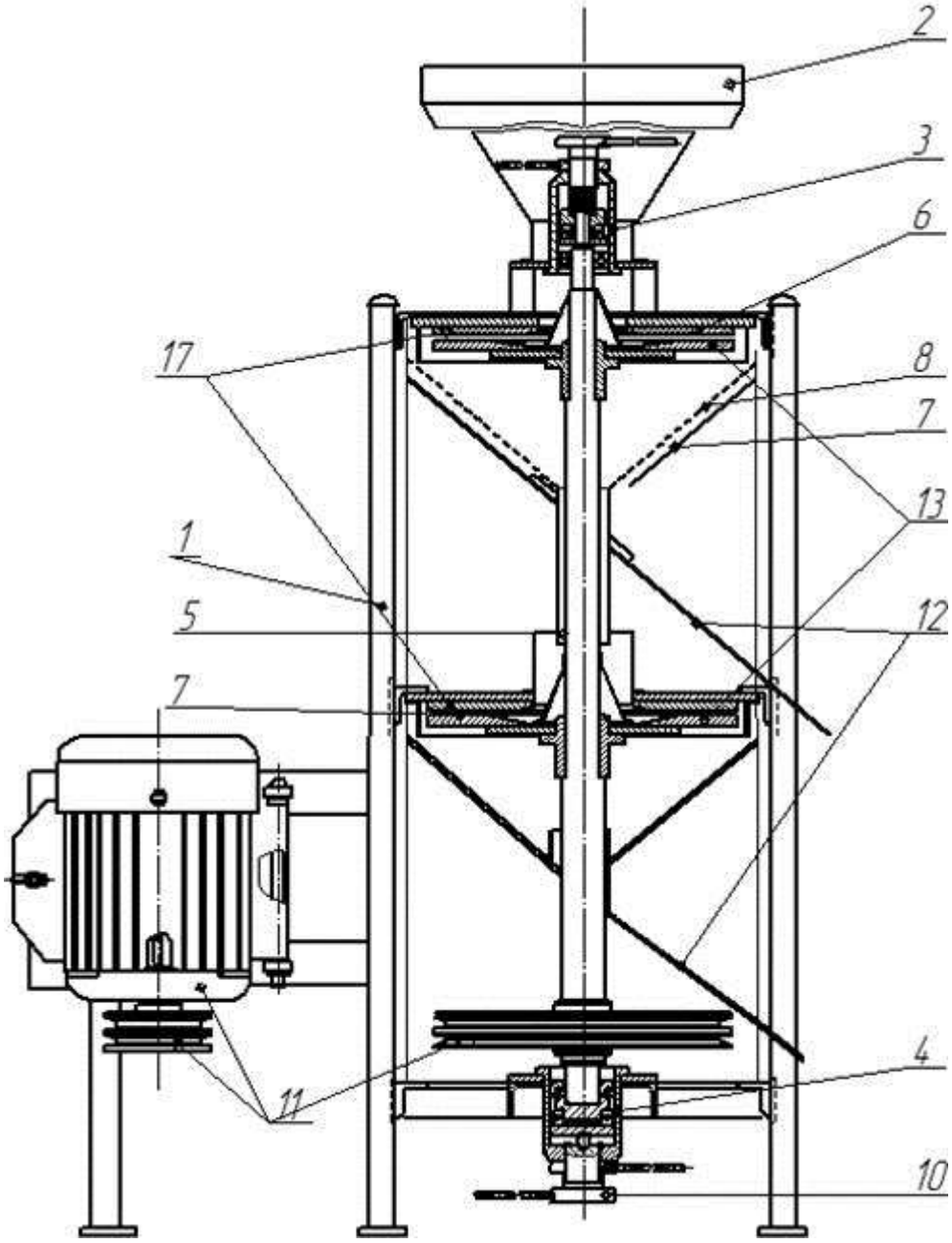
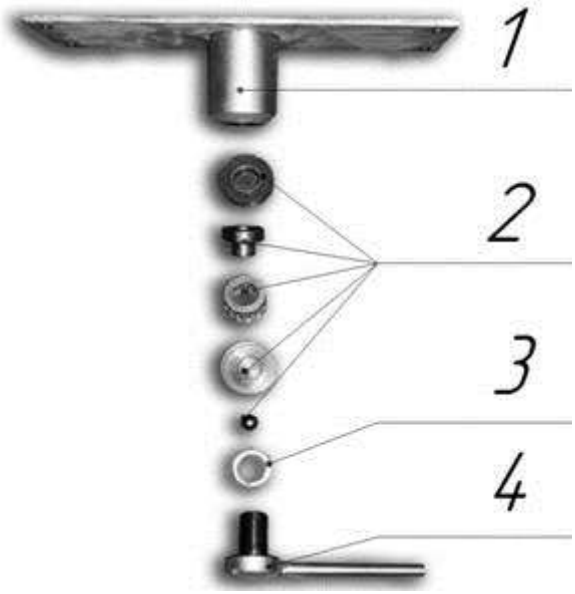


Рисунок 3.1 – Схема дискового измельчителя кормового зерна по патенту РФ № 2511291

Дисковый измельчитель кормового зерна работает следующим образом.

Измельчаемый продукт из приемной воронки 2 самотеком через цилиндрическое отверстие в неподвижном диске 17 поступает на перую пару дисков 6, зерно попадает в приёмный пояс 14 (рис 3.3), переходя в подающий пояс 15, подвергается предварительной деформации подающими бороздками и окончательно измельчается в модульном поясе 16. Затем, измельченный продукт попадает на конусообразное решето сепаратора 8 и, проходя через него отводится по наклонному желобу 9. Крупная фракция, которая не прошла через решетко сепаратора 8, сходит по нему и попадает на вторую пару дисков 7, и таким же образом доизмельчается. Аналогичным образом готовый продукт отводится по наклонному желобу 9.

Таким образом дисковый измельчитель кормового зерна способен за один цикл произвести две фракции заданных модулей помола



1 – стакан регулирующего устройства; 2 – радиально-упорный узел; 3 – контр гайка; 4 – регулировочный винт.

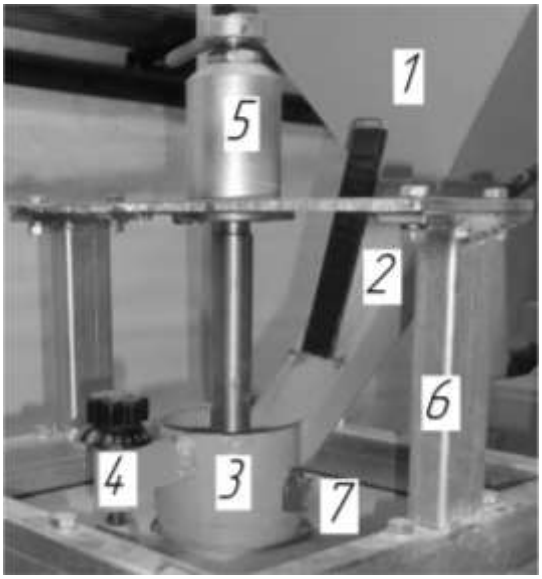
Рисунок 3.2 – Нижняя опора вала измельчителя

Рабочую поверхность дисков измельчителя образуют три пояса (рис 3.3), имеющих оригинальные геометрические элементы, обеспечивающие прием, подачу и задаваемую степень измельчения продукта технологическим пространством, образуемым дисковой парой.

14 – приёмный пояс; 15 – подающий пояс; 16 – модульный пояс.

Рисунок 3.3 – Диск измельчителя

Дозатор-распределитель (рис 3.4), закрепленный на плите неподвижного диска 7, обеспечивает равномерное распределение измельчаемого материала по периметру приемного конуса и препятствует его ненормированной подаче.



1 – бункер; 2 – питатющий лоток; 3 – цилиндр дозатора - распределителя; 4 – регулировочный винт; 5 – верхняя опора вала; 6 – рама; 7 – плита неподвижного диска.

Рисунок 3.4 – Дозатор - распределитель

Подача материала на измельчитель регулируется вертикальным перемещением цилиндра дозатора - распределителя 3, регулировочным винтом 4.

Изменение зазора между дисками осуществляется посредством перемещения вала регулировочным винтом 4 (рис 3.2).

В процессе исследования измерялись и определялись следующие величины:

– продолжительность опыта;

– масса измельченного продукта за время опытов;

– модуль помола;

– мощность на привод рабочего органа.

Результаты измерений заносились в журнал экспериментальных исследований.

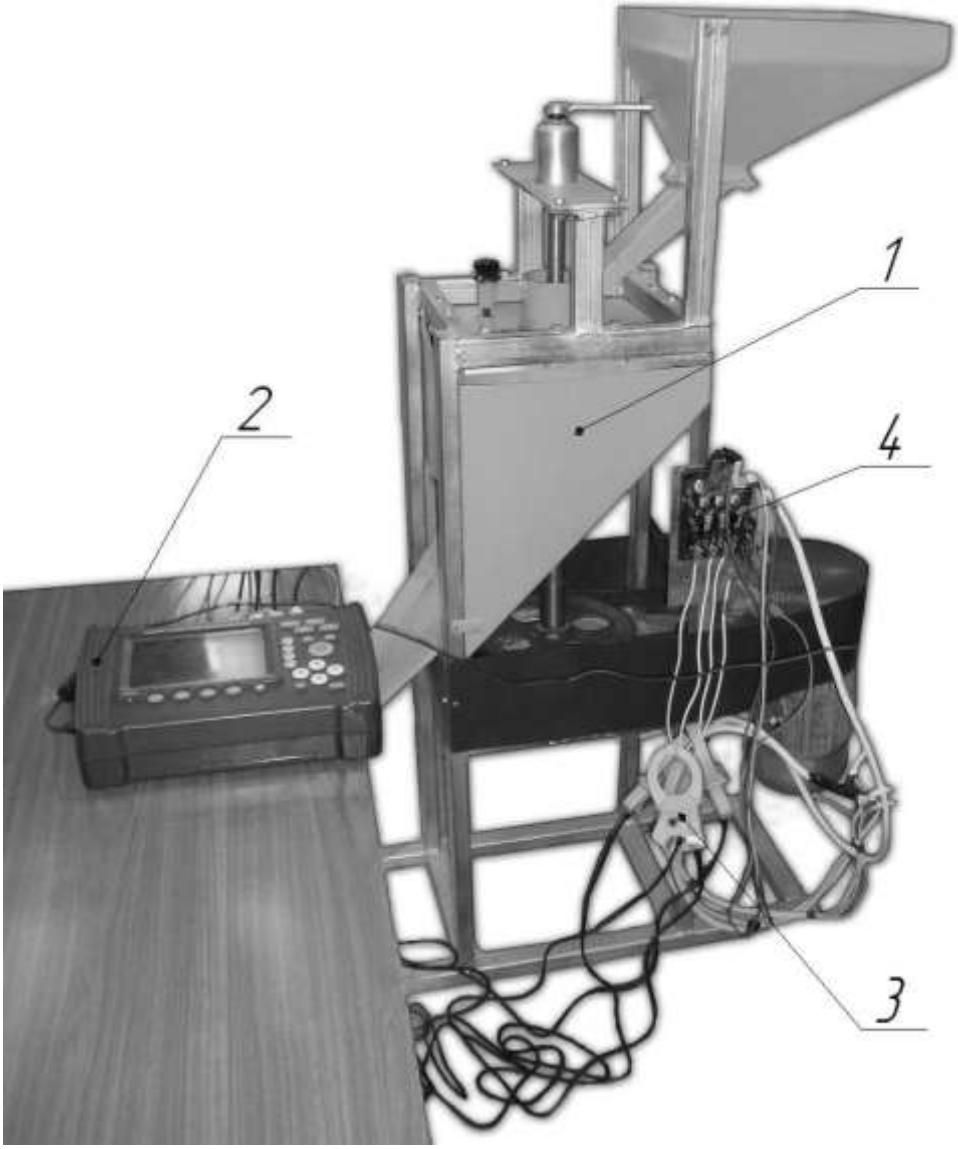
При проведении эксперимента мощность на привод дискового рабочего органа регистрировалась при помощи измерительного аналитического комплекса HIOKI POWER QUALITY ANALYZER PW3198 (рис 3.5)

Продолжительность опыта от начала до конца процесса измельчения порции зерна оценивалась по показаниям HIOKI POWER QUALITY ANALYZER PW3198. Масса порции измельченного продукта от (3 до 5) повторностей определялась на аналитических электронных весах HJCHLAHD.

После получения и первичной обработки информации в процессе опытов, дальнейшая ее статистическая и графическая обработка осуществлялась на стационарном компьютере в среде Excel.

Показания комплекса отображались на мониторе HIOKI POWER QUALITY ANALYZER PW3198, заносились в карту памяти и позволяли достаточно точно определять пусковой период, установившийся режим работы измельчителя и «выбег» на режим холостого хода.

Пробы измельченного продукта отбирались на установившемся режиме.



1 – Дисковый измельчитель кормового зерна; 2 – HIOKI POWER QUALITY ANALYZER PW3198; 3 – трансформаторы тока; 4 – автомат (защитный)

Рисунок 3.5 – Общий вид лабораторной установки

3.3 Общая методика экспериментальных исследований

При проведении опытов использовали зерновки озимых и яровых сортов пшеницы и ячменя, кукурузы и гороха.

Для каждой серии опытов брались новые навески зерна, заготовленные в одно время. Физико-механические свойства и упруго-вязкие характеристики, геометрические размеры *l,b,h*, влажность *W* и сопротивление разрушению. Определение физико-механических свойств кормов выполнялось по известным методикам для средних проб, отобранных по

общепринятой методике согласно РД. 10.19.2 – 90 /63/., в горизонтальных хранилищах учебно – опытного фермерского хозяйства института [88 – 91].

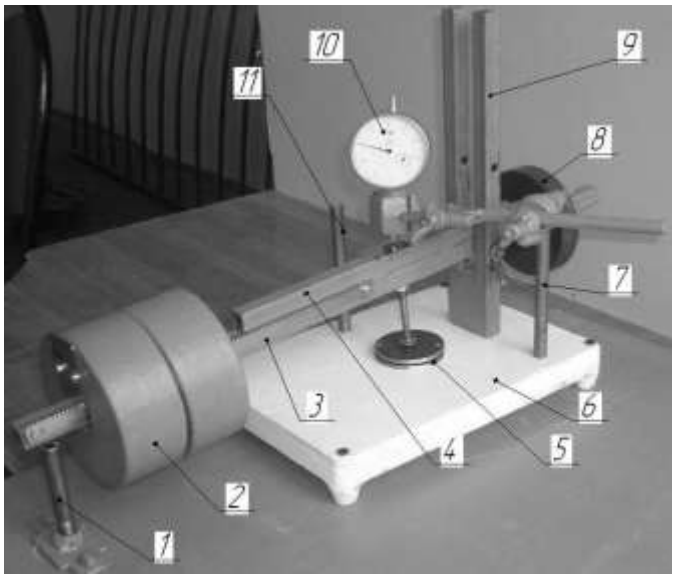
Оборудование лаборатории научных исследований кафедры МТП и ПСХП позволяло определить:

– плотность (объемную массу, пористость) зерна, фракционный состав и гранулометрический;

– модуль помола, фракционный состав продуктов помола, степень измельчения и построить помольные характеристики;

– мгновенный Н и длительный Е модули деформации, время релаксации n и коэффициенты вязкости и динамичности k_d.

Для получения данных и построения диаграмм деформации зерновок основных кормовых культур, оценки границ упругих и пластических реакций на внешние нагрузки в технологиях измельчения, определения (уточнения) прочностных характеристик был разработан настольный измерительный комплекс (рис.3.6) и адаптирована известная методика исследования упруго-вязких свойств материалов растительного происхождения [15,23,62].



1 – установочный винт; 2 – подвижные грузы; 3- линейка грузовая; 4- нагрузной рычаг; 5- предметная площадка; 6 – основание; 7 – кранштейн микрометрической головки; 8 – балансир; 9- стойка; 10- микрометрическая головка; 11 –опора тарированого рычага.

Рисунок 3.6 – Настольный измерительный комплекс в состоянии измерения

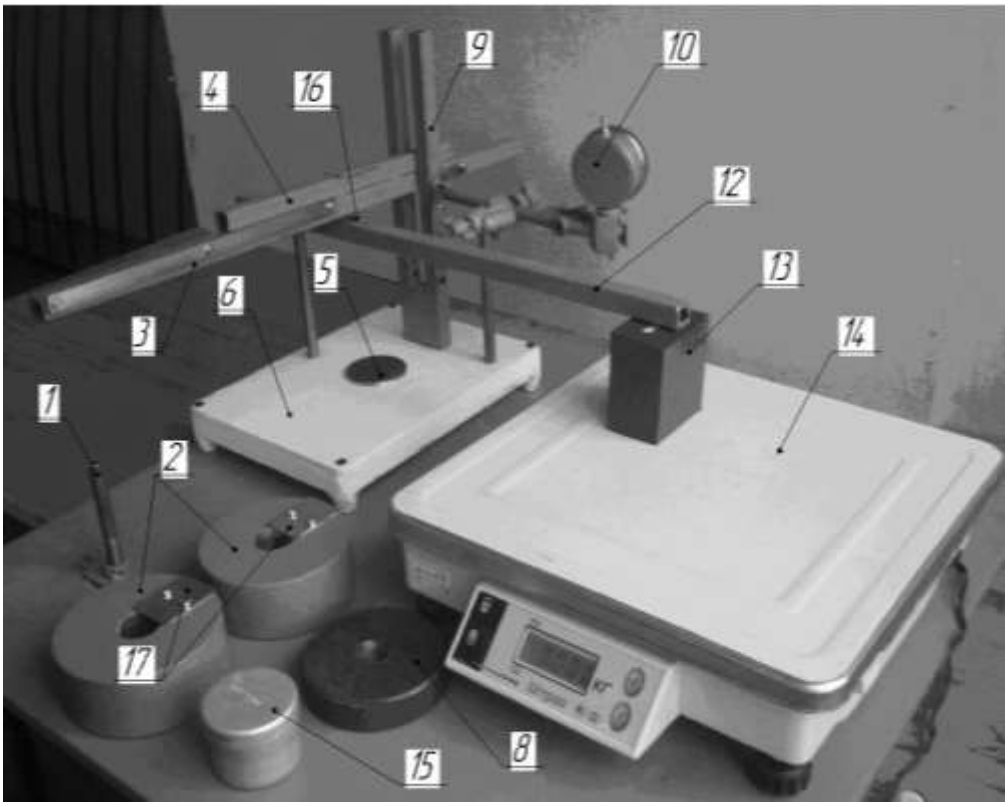


Рисунок 3.7 – Настольный измерительный комплекс в состоянии тарирования

Для подготовки измерительного комплекса к работе проводилось его тарирование. Процедура тарирования выполнялась 3-х кратным нагружением и разгрузкой. Усредненные результаты тарирования сводились в таблицу, для построения тарировочной характеристики в масштабе, обеспечивающей интерполяцию положения грузов и величину усилия с точностью до 0,15 Н.

По завершению процедуры тарирования, заполнения таблицы и построения тарировочной характеристики определялась влажность зерна (пшеница, ячмень, нут и др.) с помощью экспрессвлагомера Wile 55. Данные определения влажности усреднялись по 3-5 кратной повторности, заносились в рабочий журнал наблюдений, в строку «условия проведения опыта».

По результатам измерений, построения диаграмм деформации и релаксации процессов разрушения определялись :

–. разрушающие напряжения в зависимости от влажности зерна для различных его положений;

–. время релаксации для зерновок (пшеница, ячмень, нут, и др.);

– мгновенный и длительный модули деформации;

– коэффициент динамичности k_d, в соответствии с теоретическими предпосылками (рис 2.4).

– Усилием равным 30-35% от $\sigma_{разр}$ границы упругих деформаций на диаграммах, после определения их размеров, устанавливались на предметную площадку под нажимное устройство, сбалансированное балансировочным грузом. Микрометрическая головка поворачивалась в положение «измерение» и обнуляется. Нагрузочный разновес устанавливался в положение заданного усилия, согласно тарировочной характеристике и переводился в рабочее положение упорным винтом (рис 3.7). Записывалось начальное положение стрелки микрометрической головки. Далее показания снимались через 10, 20, 30, 60 секунд, 5, 10, 15, 20, 30 мин. и заносились в таблицу. По данным 5 измерений строилась зависимость $\varepsilon=f(t)$ для средних значений ε. Точка графика, в которой $\varepsilon\approx const$ - асимптота линии // оси абсцисс, признавалась временем релаксации «n» (рис. 2.3).

Анализ полученных зависимостей (глава 2) даёт общее представление о влиянии факторов на энергетику процесса, однако оценка взаимодействий факторов затруднительна.

Для оценки и выбора факторов модели процесса измельчения выполнена их экспертная оценка по известной методике [6].

Для выяснения мнения экспертов была разработана анкета (табл.3.1), к которой прилагалась «легенда», включавшая чертеж общего вида (рис. 3.1) измельчителя, подвижного диска (рис. 3.3) и междискового пространства (рис 2.11) с указанием границ поясов и геометрических параметров рабочих элементов. В состав экспертов вошли профильные специалисты ученые СКНИИМЭСХ, Сев кав МИС и АЧГАА и практики.

По результатам опроса специалистов (табл 3.1) составлена таблица и оценки согласованности их мнений определены: W – коэффициент конкордации по зависимости, в которой k – число факторов, m – число специалистов – экспертов.

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)} = \frac{12 \cdot 6802.96}{81 \cdot 1716} = 0.59 \quad (3.1)$$

После вычисления коэффициента конкордации оценивали его значимость по χ^2 – критерию Пирсона, равному

$$\chi^2_{эксп} = m(k-1)W = \frac{12S}{m(k+1)} = 58{,}41. \quad (3.2)$$

Табличные значения χ^2 критерия с числом степеней свободы $f = (k-1) = 12-1 = 11$ равны соответственно для уровней значимости: 0,10; 0,05; и 0,01, а расчитанные – 17,275; 19,675 и 24,725, что значительно ниже полученного значения $\chi^2_{эксп}$=58,41.

Таким образом можно утверждать, что коэффициент конкордации значительно отличается от нуля и можно утверждать, что согласованность экспертов не является случайной.

По результатам опроса и критериальной оценки значимости факторов построена диаграмма рангов факторов (рис 3.8)

Из приведенной диаграммы рангов следует, что вывод о том, что для экспериментальных исследований и получения уровнения регрессии целесообразно отобрать такие факторы как:

x_9 – зазор между дисками, $(\delta_м)$ мм;

x_{11} – частота вращения подвижного диска, мин$^{-1}$;

x_3 – отношение площади модульного пояса к площади подающего;

x_4 – влажность зерна, %;

x_5 – подача зерна в приемный пояс кг/с

Выделенные экспертами факторы управляемые, контролируемые и независимые, что позволяет планировать многофакторный эксперимент для выяснения их влияния на энергоемкость процесса измельчения, а так же оценки влияния значимости взаимодействий между ними.

Таблица 3.1

Анкета оценки факторов, влияющих на энергетические показатели процесса измельчения зерна дисковой парой

Обозначение фактора	Наименование фактора и единицы измерения	Уровни варьирования		Значимость фактора
		нижний	верхний	энергоемкость
1	2	3	4	5
X_1	Отношение площади деформации к площади релаксации	меньше	больше	
X_2	Отношение площади модульного пояса к площади подающего	2	4	
X_3	Угол между канавками подвижного и неподвижного дисков, град.	90	110	
X_4	Влажность зерна, %	10	18	
X_5	Угол подъема подающих канавок, град	6	10	
X_6	Ширина подающих канавок, мм	20	30	
X_7	Ширина модульных канавок, мм	8	16	
X_8	Подача зерна в приемный пояс, кг,с	0,010	0,030	
X_9	Зазор между дисками, мм	1,0	3,0	
X_{10}	Угол подъема приемного конуса, град	10	20	
X_{11}	Частота вращения подвижного диска, $мин^{-1}$	600	900	
X_{12}	Угол снижения приемного конуса, град	12	24	

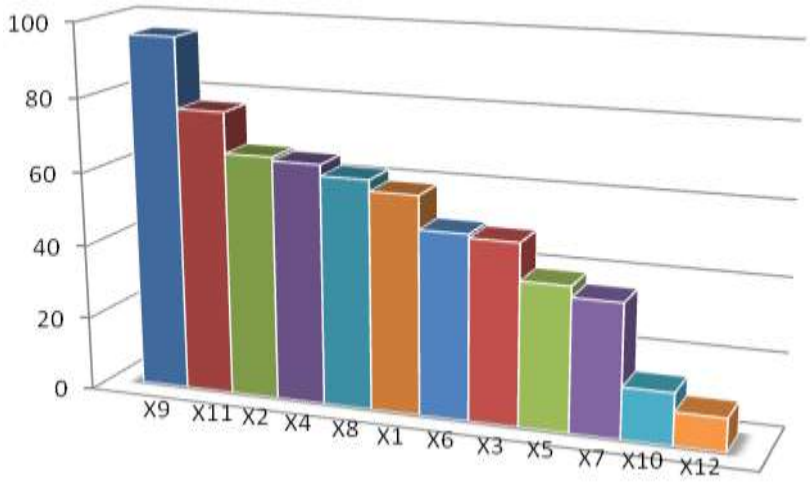


Рисунок 3.8 – Диаграмма рангов факторов, отражающая общее мнение специалистов

Для исследования совместного влияния основных факторов – зазора между дисками δ, влажности зерна W и частоты вращения подвижного диска ω – на качественные показатели процесса измельчения – модуля помола, был составлен полный факторный эксперимент по матрице планирования типа ПФЭ 2^3 (табл 3.2). Пользуясь таблицей случайных чисел, была принята следующая рандомизированная последовательность опытов: 4, 3, 8, 5, 7, 2, 1, 6.

Таблица 3.2

Матрица планирования ПФЭ 2^3

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_1
2	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y_2
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_3
4	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y_4
5	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_5
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y_6
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_7
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y_8

Факторы и уровни их варьирования представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Основные факторы и уровни их варьирования

Факторы / Уровни	зазор между дисками	влажность зерна	частота вращения подвижного диска
Натуральное обозначение	δ, мм	W, %	ω, мин$^{-1}$
Верхний	1	16	1000
Основной (нулевой)	0,75	14	800
Нижний	0,5	12	600
Кодированное обозначение	X_1	X_2	X_3
Верхний	+1	+1	+1
Основной (нулевой)	0	0	0
Нижний	-1	-1	-1

В качестве критерия оптимизации, характеризующего работу дискового измельчителя кормового зерна, принят модуль помола *M*.

По результатам многофакторного эксперимента решалась задача получения уравнение регрессии в кодированном виде

$$y = b_0 + b_1 x_1^2 + b_2 x_2^2 + b_3 x_3^3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_7 x_1 x_2 x_3 . \quad (17)$$

Однородность дисперсий проверялась по критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии проверялись по критерию Стьюдента.

Адекватность математической модели была проверена по критерию Фишера, при принятом уровне значимости $\alpha = 0{,}05$.

По результатам оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии анализа двумерных сечений поверхности отклика ставилась задача получения значений рациональных параметров дискового измельчителя, определение удельных характеристик и, составлении методики инженерного расчета модельного ряда.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Физико-механические свойства и упруго-вязкие характеристики зерна

Исследования механико-технологических свойств кормового зерна, выполненных ранее, ставили своей задачей определение прочностных характеристик, фракционных, аэродинамических и геометрических особенностей, определяющих их поведение и реакции в агроинженерных машинных технологий [9,12,30,99,100].

К технике 21 столетия предъявляются новые требования, включающие не только выполнение заданного процесса но и энергоресурсосбережение, экологичность и безопасность, прецизионность и адаптивность. Поэтому дальнейшее изучение свойств материалов сельскохозяйственного назначения и особенно кормовых – важнейшего ресурса управления продукционной функцией животных и птицы, является определяющим условием создания новой техники.

Предложенные в работе аналитические зависимости для определения параметров систем дискового измельчителя кормового зерна, определение его энергетических и качественных характеристик требуют дальнейшего изучения и уточнение свойств материала, подлежащего переработке.

В соответствии с программой экспериментальных исследований определению и уточнению подлежат:

– геометрические, фрикционные, массообъемные и прочностные характеристики и свойства;

– упруго-вязкие характеристики и реакции на внешние воздействия.

Исследования проводились по известным, адаптированным и вновь разработанным методикам, обеспечивающим требуемую точность, достоверность и воспроизводимость результатов [90,91,97].

Для получения достоверных результатов зерно кормовых культур подвергалось предварительной подготовке в лабораторных условиях.

Влажность задавалась выдерживанием сетчатых пакетов экспериментальных порций зерна в эксикаторах, заполненных водой слоем 20 мм в течении от 24 до 96 часов при температуре 22-24 °с. Объем сетчатого пакета задержал 3 заправки измерительной емкости экспресс влагомера (250-300 г.) Wile 55 (рис. 4.1). Перед определением влажности экспресс влагомером контролировалась масса зерна без упаковки результаты измерений и взвешивания после расчетов сравнивались и заносились в журнал наблюдений. Результаты увлажнения зерна кормовых культур в эксперименте представлены в таблице 4.1.

Условия влажности: W=56 – 60, t°c=22 – 24, B=756 – 758 мм., рт ст.

Таблица 4.1

Влияние времени обработки зерна в эксикаторах на влажность, %.

Культура сорт	время выдержки, час					расчетная влажность 72 %
	0	24	48	72	96	
1	2	3	4	5	6	7
ячмень						
Виконт	11,23	12,4	13,45	14,35	15,21	14,01
Вакула	10,71	12,0	13,15	14,25	15,15	13,95
пшеница						
Юка	12,14	13,5	14,25	15,25	16,05	15,70
овес						
скакун	11,43	12,8	14,0	15,15	16,2	15,30
нут						
Волгоградский	12,41	13,82	15,13	16,25	17,36	16,94

Из данных таблицы следует, что максимальный прирост влажности от 1,5…1,42 % имеет место первые сутки с последующим уменьшением его до 0,8…1,11% за четвертые сутки. Пробы кормового зерна, отобранные в горизонтальных зерноскладах УОФХ института и вентилируемых бункерах ОАО «Учхоз Зерновое» накладываются на диапазон, полученный в эксперименте увлажнения табл. 4.1 [88,89].

Визуально наблюдалось отсутствие поверхностной влаги, что свидетельствовало об увлажнении внутренней структуры зерновок.

1 – пурка; 2 – аналитические весы HIGHLAND;
3 – влагомер зерна Wile 55; 4-6 – эксикаторы с сетчатыми емкостями

Рисунок 4.1 – Комплект приборов и оборудования для подготовки зерна к экспериментальной оценки

Фракционные свойства и прочностные характеристики определялись с учетом исходного состояния зерна и характера нагружения.

Площадь поперечных сечений зерновок определялась измерением длины l, толщины h и ширины b по формулам соответственно положениям:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{горизонтальном;} & F_г = \pi\left(\frac{l}{2}\cdot\frac{b}{2}\right) = \frac{\pi}{4}lb; \\ \text{на боку} \quad ; & F_б = \pi\left(\frac{l}{2}\cdot\frac{h}{2}\right) = \frac{\pi}{4}lh; \\ \text{вертикальном} \quad . & F_b = \pi\left(\frac{l}{2}\cdot\frac{h}{2}\right) = \frac{\pi}{4}bh. \end{array}\right\} \qquad (4.1)$$

Статический предел прочности определялся как отношение разрушающего усилия к площади соответствующего ее объему зерновок определялся по аналогии с поперечной площадью по измеряемым размерам с допущением об их эквивалентной сферической форме приведенной к фактическим радиусам, ориентированным по осям прямоугольных координат.

$$V_з = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{l}{2}\cdot\frac{h}{2}\cdot\frac{b}{2}\right) = \frac{\pi}{6}(lhb). \qquad (4.2)$$

Плотность зерновок определялась как отношение массы 100 зерен случайной выборки к их суммарной массе.

Размеры зерен измерялись штангенциркулем и округлялись до 0,1 мм по нониусу, результаты расчетов плотности и пределов прочности округлялись до второго знака табл. 4.2

Таблица 4.2

Физико-механические и технологические характеристики зерна

культура, влаж-ность %	длина, *l* ширина, *b* толщина, *h*, мм	коэффициент трения, f_c / f_k	плотность, г/см^3	предел прочности, МПа	
				статический	динамический
1	2	3	4	5	6
Ячмень 10,71-14,35	7,0…14,6 2,0…5,0 1,4…4,5	$\frac{0,36…0,59}{0,33...0,47}$	1,33…1,41	7,11…7,28	12,81…12,96
пшеница 12,41-15,25	4,0…8,6 1,6…4,0 1,5…3,8	$\frac{0,36…0,58}{0,31...0,53}$	1,24…1,53	6,47…6,62	11,18…11,98
овес 11,43-15,15	8,0…18,6 1,4…4,0 1,2…3,6	$\frac{0,41…0,61}{0,38...0,58}$	1,21…1,42	3,91…4,03	6,78…7,04
нут 12,41-16,25	4,0…8,8 3,7…8,0 3,5…8,0	$\frac{0,41…0,43}{0,39...0,40}$	1,15…1,51	4,55…7,80	7,94…8,43

Разрушение твердых частиц на части связано, согласно рабочей гипотезе, с их деформацией и образованием поверхностей скалывания.

Так для разрушения эндосперма твердой пшеницы скалыванием требуется напряжение 0,95-1,10 мПа, мягких сортов - 0,28-0,32 мПа. Удельная энергия измельчения, первичного разрушения зерна, поэтому также велика и находится на уровне 1,9-4 кДж/кг. Как и многие материалы растительного происхождения зерновки обладают упруго-пластическими свойствами. Соотношение между упругой и пластической деформациями, в зависимости от химического состава зерновок, составляет 10...35 (90...65) процентов. Таким образом основные затраты энергии измельчения находятся в области пластических деформаций.

4.2 Результаты реализации полнофакторного эксперимента и анализ взаимодействия параметров измельчителя

Методика проведения экспериментов описана в разделе 3.3. После проведения экспериментов и получения их результатов был проведен регрессионный анализ. Все расчеты, включая построение графиков, были выполнены в программе Microsoft

В качестве критерия оптимизации был принят показатель «модуль помола (Y)»

На основании поисковых экспериментов, литературных данных и мнений экспертов были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов, а сами факторы представлены в таблице 3.2.

Результаты многофакторного эксперимента, устанавливающего зависимость между модулем помола, влажностью зерна, частотой вращения подвижного диска и зазором между дисками приведены в таблице 4.3.

По результатам многофакторного эксперимента определялись коэффициенты регрессии и было составлено уравнение регрессии в кодированном виде

$$y = b_0 + b_1 x_1^2 + b_2 x_2^2 + b_3 x_3^3 + b_4 x_1 x_2 + b_5 x_1 x_3 + b_6 x_2 x_3 + b_7 x_1 x_2 x_3 \quad (4.3)$$

Таблица 4.3

Измельчение зерновок пшеницы дисковым измельчителем

№ опыта	Факторы			Масса продукта по повторностям, г			Числовые характеристики
	X1	X2	X3	Первая повторность	Вторая повторность	Третья повторность	M
	δ, мм	W, %	ω, мин$^{-1}$				
1	1	16	1000	69,8	70,3	69,6	2,59
2	1	16	600	145,2	139,6	148,2	2,6
3	1	12	1000	91,4	96,4	91,2	1,99
4	1	12	600	49,9	49,0	52,7	2,14
5	0,5	16	1000	38,1	38,0	26,5	2,03
6	0,5	16	600	55,8	74,3	62,0	2,33
7	0,5	12	1000	35,9	36,8	38,2	1,69
8	0,5	12	600	62,1	59,3	57,3	1,99

Регрессионный анализ проводился с помощью системы Excel. Определение коэффициентов регрессии математического ожидания представлены в таблице 4.4

В результате обработки опытных данных известным методом была построена статистическая математическая модель процесса измельчения зерновок в кодированном виде:

$$Y=2,1708+0,1525X_1+0,2283X_2-0,0950X_3+0,0450X_1X_2-$$
$$0,0267X_1X_3+0,0208X_2X_3+0,0208X_1X_2X_3 \quad (4,4)$$

Анализируя полученное уравнение регрессии, следует отметить, что основное внимание на формирование степени измельчения, величину модуля помола, оказывает зазор между дисками X1, что вполне закономерно в том числе и зависимости (2.39).

Особого комментария заслуживает влияние на величину модуля помола фактора X3 – частоты вращения дисков, обратной величиной которого является время нахождения зерна в измельчающем пространстве. Тогда чем меньше X3 тем больше время измельчения, тем ниже модуль помола, что соответствует самому технологическому принципу заложенному в работу дисковой пары.

Таблица 4.4

Коэффициенты регрессии математического ожидания

№ п.п.	b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b123	Yэксп.	Yteop.
1	2,5700	2,5700	2,5700	2,5700	2,5700	2,5700	2,5700	2,5700	2,57000	2,5700
2	2,6233	2,6233	2,6233	-2,6233	2,6233	-2,6233	-2,6233	-2,6233	2,62333	2,6233
3	1,9400	1,9400	-1,9400	1,9400	-1,9400	1,9400	-1,9400	-1,9400	1,94000	1,9400
4	2,1600	2,1600	-2,1600	-2,1600	-2,1600	-2,1600	2,1600	2,1600	2,16000	2,1600
5	2,0800	-2,0800	2,0800	2,0800	-2,0800	-2,0800	2,0800	-2,0800	2,08000	2,0800
6	2,3233	-2,3233	2,3233	-2,3233	-2,3233	2,3233	-2,3233	2,3233	2,32333	2,3233
7	1,7133	-1,7133	-1,7133	1,7133	1,7133	-1,7133	-1,7133	1,7133	1,71333	1,7133
8	1,9567	-1,9567	-1,9567	-1,9567	1,9567	1,9567	1,9567	-1,9567	1,95667	1,9567
	2,1708	0,1525	0,2283	-0,0950	0,0450	0,0267	0,0208	0,0208		

Уравнение регрессии (4.4) устанавливает зависимость между критерием оптимизации *Y* (модулем помола продукта M), зазором между дисками δ, влажностью зерна W и частотой вращения подвижного диска ω. С помощью критерия Кохрена проведена оценка однородности дисперсий. Критерий Кохрена, по расчетам, равен 0,3729, а табличное значение [G] = 0,5157. Полученные данные позволяют сделать вывод, что гипотеза об однородности дисперсии принимается.

Проверка значимости коэффициентов регрессии, проводимая по критерию Стьюдента показала, что незначимыми являются коэффициенты: b_{12} = 0,0450; b_{13}=0,0267; b_{23}=0,0208; b_{123}=0,0208 таблица 4.5.

Таблица 4.5

Коэффициенты уравнения регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
2,1708	0,1525	0,2283	0,0950	0,0450	0,0267	0,0208	0,0208
Значимый	Значимый	Значимый	Значимый	Незначимый	Незначимый	Незначимый	Незначимый
2,1708333	0,1525	0,22833333	-0,095	0	0	0	0

После соответствующих преобразований уравнение (4.4) приобрело вид:

$$Y = 2{,}1708 + 0{,}1525X_1 + 0{,}2283X_2 - 0{,}0950X_3. \quad (4.5)$$

Дисперсия коэффициентов регрессии 0,00721, Критерий Фишера для данного уравнения F=1,9726, что меньше табличного значения критерия Фишера [F]=3. Значит, уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным таблица 4.6.

Таблица 4.6

Экспериментальные и расчетные значения коэффициентов регрессии

№ п.п.	b_1	b_2	b_3	$Y_{эксп.}$	$Y_{теор.}$
1	+1	+1	+1	2,5700	2,4567
2	+1	+1	-1	2,6233	2,6467
3	+1	-1	+1	1,9400	2,0000
4	+1	-1	-1	2,1600	2,1900
5	-1	+1	+1	2,0800	2,1517
6	-1	+1	-1	2,3233	2,3417
7	-1	-1	+1	1,7133	1,6950
8	-1	-1	-1	1,9567	1,8850

Используя полученную математическую модель, были построены поверхности отклика (рисунок 4.2; 4.3; 4.4)

На поверхностях отклика отображены зависимости взаимодействия факторов, что свидетельствует о контролируемом процессе, а так же функциональном уровне связи критерия оптимизации – модуля помола с

зазором в модульном поясе и частотой вращения рабочего диска в границах их рациональных значений.

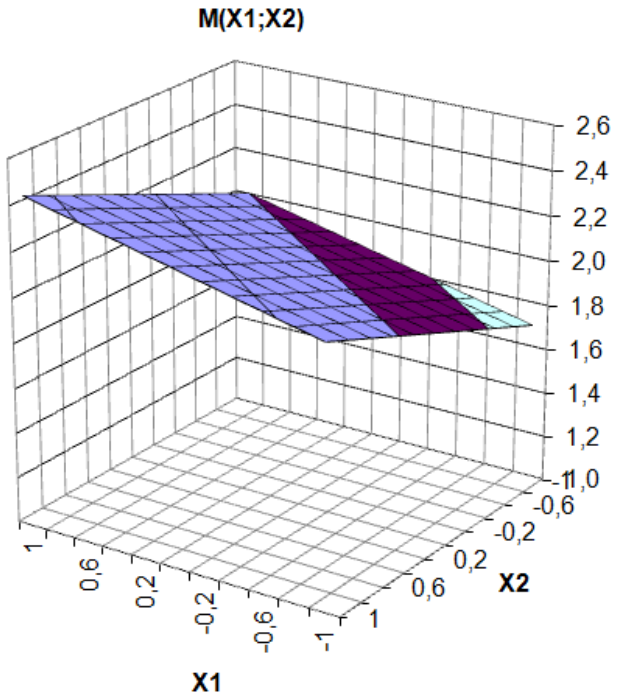


Рисунок 4.2 – Поверхность отклика взаимодействия факторов зазора (x1) и влажности (x2)

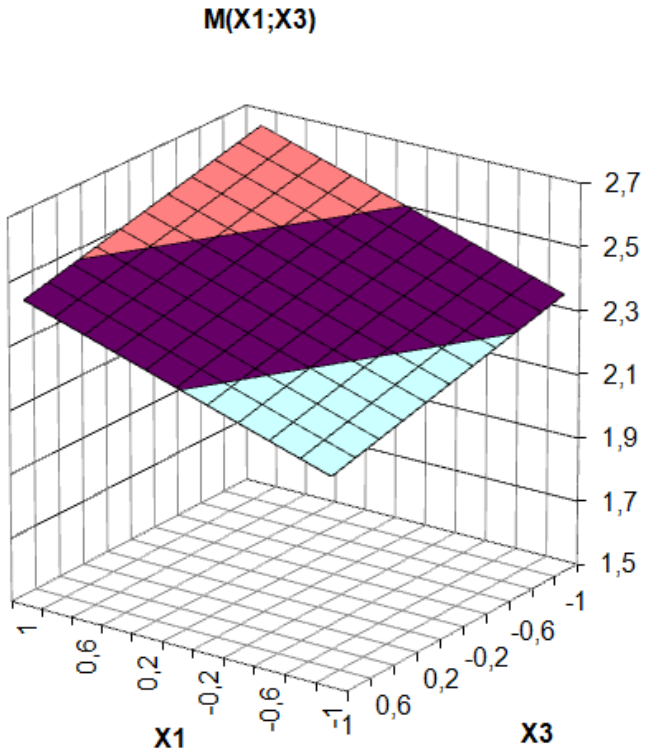


Рисунок 4.3 – Поверхность отклика взаимодействия факторов зазора (x1) и частоты вращения (x3)

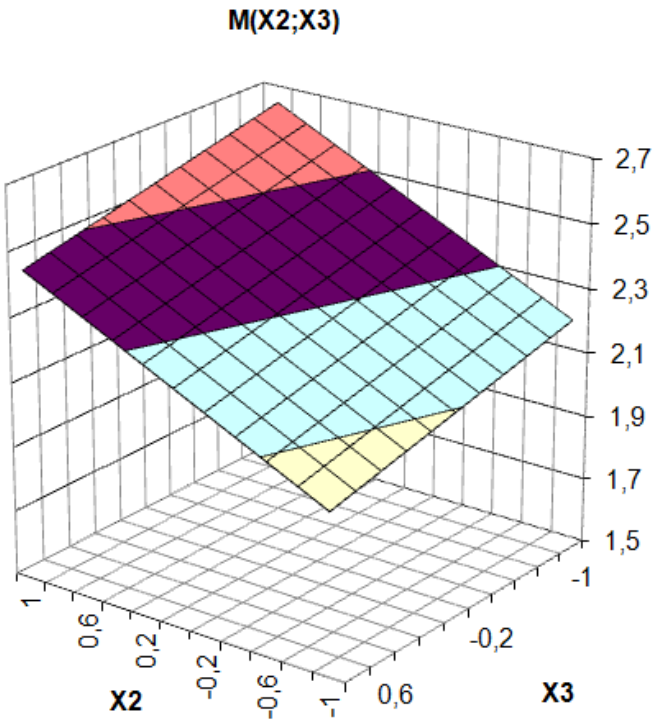


Рисунок 4.4 – Поверхность отклика взаимодействия факторов влажности (x2) и частоты вращения (x3)

Анализируя представленные поверхности, следует отметить, что с уменьшением модульного зазора и влажности зерна (рис. 4.2) величина модуля помола уменьшается, что соответствует рабочему параметру (δ) измельчителя и требованиям к кормовому зерну (W).

Увеличение модульного зазора и частоты вращения рабочего диска (рис 4.3) ведет к ухудшению процесса измельчения и увеличению модуля помола.

Наконец, влияние влажности зерна X2 и частоты вращения диска X3 на модуль помола следует признать рациональными обеспечивающими управляемый процесс при средних значениях.

4.3 Технологические параметры дискового измельчителя

Согласно плану эксперимента результаты модуля помола рандомизированных опытов при постоянной подаче равной 6000 кг/м^2 представлены в таблицах (4.7 – 4.10)

Результаты экспкриментов № 3;7

Таблица 4.7

№ экс-та	X1	X2	X3	1-я пов-ть	2-я пов-ть	3-я пов-ть	Средняя пр-ть	Модуль помола
3	1	12	1000	91,4	96,4	91,2	93,0	1,99
7	0,5	12	1000	35,9	36,8	38,2	36,9	1,69

Результаты экспкриментов № 4;8

Таблица 4.8

№ экс-та	X1	X2	X3	1-я пов-ть	2-я пов-ть	3-я пов-ть	Средняя пр-ть	Модуль помола
4	1	12	600	49,9	49,0	52,7	50,5	2,14
8	0,5	12	600	62,1	59,3	57,3	59,5	1,69

Результаты экспкриментов № 5;1

Таблица 4.9

№ экс-та	X1	X2	X3	1-я пов-ть	2-я пов-ть	3-я пов-ть	Средняя пр-ть	Модуль помола
5	0,5	16	1000	38,1	38,0	26,5	34,2	2,03
1	1	16	1000	69,8	70,3	69,6	69,9	2,59

Результаты экспкриментов № 2;6

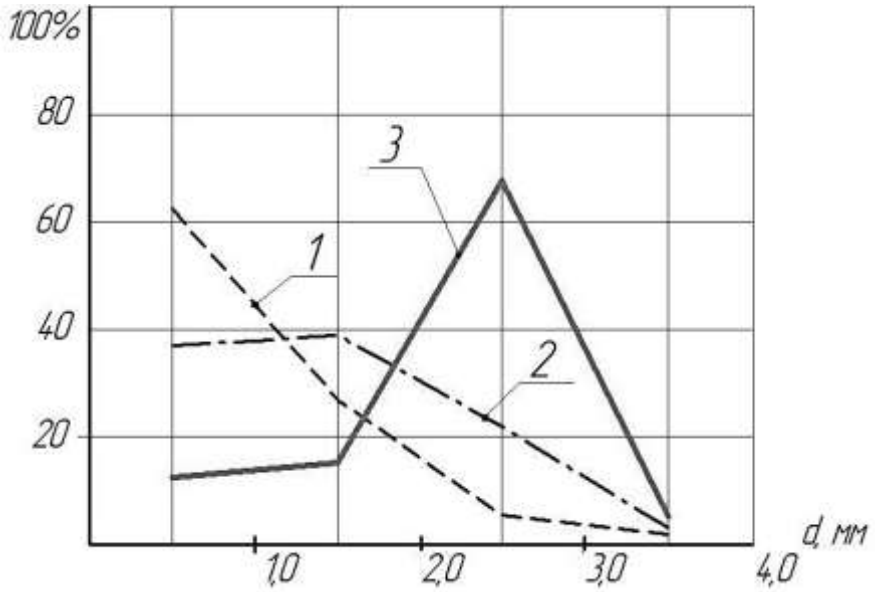
Таблица 4.10

№ экс-та	X1	X2	X3	1-я пов-ть	2-я пов-ть	3-я пов-ть	Средняя пр-ть	Модуль помола
2	1	16	600	145,2	139,6	148,2	144,3	2,6
6	0,5	16	600	55,8	74,3	62,0	64,0	2,33

При вышеуказанных параметрах дискового измельчителя фракция менее 1 мм составляет 1,2- 3%.

Удельный расход энергии при измельчении в дисковом измельчителе в 2,5 раза ниже, чем в дисковой дробилке Я 31.56.00.00.005 при одинаковом модуле помола М=1,69

Качество готового продукта оценивалось с помощью вариационных помольных характеристик (рисунок 4.5) для различных модулей помола.



1 – мелкий помол; 2 – средний помол; 3 – крупный помол.

Рисунок 4.5 – Вариационные помольные характеристики для различных модулей измельчения

Полученный в дисковом измельчителе готовый продукт имеет выровненный гранулометрический состав и соответствует ГОСТ на комбикорма.

Заданные фракции при мелком, среднем и крупном модулях помола составляют (рис. 4.5):

$$M_{мелкий}(0,68)=83,76\%$$
$$M_{средний}(1,69)=86,05\%$$
$$M_{крупный}(2,58)=97,89\%$$

При этом содержание фракции менее 1 мм не превышало 1,2%,

Энергоемкость процесса при стандартных модулях помола составила $А_{уд}$: мелком (0,68)=1,86 кВт·ч/т; среднем (1,69)=1,64 кВт·ч/т; крупном (2,58)= 1,4 кВт·ч/т. кВт·ч/т.

Испытания дозатора-распределителя на макете измельчителя производительностью до 500 кг/ч в лабораторных условиях подтвердили аналитические предпосылки с достаточной вероятностью.

Статистическая обработка результатов тарировки (табл. 4.11) показала, что коэффициенты вариации по строкам (1,3,5) составили: пшеница/ячмень: однозерновая (8,4/6,0) %; секторная (9,9/7,0) %; раздельно поточная по периметру (7,9/6,0). Тогда как геометрические размеры зерен соответствующих культур (табл. 4.6) варьируют в значительно большем диапазоне (табл. 4.2).

Таблица. 4.11

Тарировочные характеристики пшеница/ячмень

Зазор Δ,(мм)	Повторности, г/с.					Статист. обр.		
	1	2	3	4	5	ср	коэф. вар. %	часовая подача кг/ч
1	5,9 / 7,8	4,7 / 6,4	5,2 / 5,1	4,7 / 6,6	3,6 / 5,6	4,82 / 6,3	8,4 / 6,6	
2	44,2 / 20,1	34,2 / 19,8	29,7 / 23,3	25 / 22,9	20 / 23,4	30,6 / 21,88	–	
3	66,7 / 39,36	81,5 / 36,5	79,4 / 38,9	76 / 39,6	74,5 / 46,2	76,34 / 40,1	9,9 / 7,0	
4	166 / 61,2	158,8 / 59,6	158,5 / 63,6	182,8 / 68,3	167,5 / 62,6	166,72 / 63,03	–	
5	194,2 / 83,9	229,2 / 78,4	268 / 89,9	236,2 / 89,5	231,8 / 93,3	231,88 / 87	7,9 / 6,0	

Δ=1 мм – соответствует однозерновой подачи,

Δ=2 мм – граница секторной подачи,

Δ=3 мм – раздельнопоточная.

4.4 Методика инженерного расчета параметров дискового измельчителя кормового зерна

Получены аналитические зависимости и результаты экспериментальных исследований (главы 2 и 4) позволяют сформировать основные положения методики определения параметров дискового измельчителя зерна по патенту РФ № 2511291.

Исходным параметром для проектирования измельчителя является его производительность Q кг/ч, которая, как показали исследования зависит от величины площади междискового пространства $F_{раб}$.

1. По удельной производительности $q_{уд}$ мелкого помола М=(0,2-1,0) мм определяется величина требуемой рабочей поверхности по отношению

$$F_{раб} = \frac{Q}{q_{уд}}, \text{ м}^2 \tag{4.6}$$

так как средний и крупный помол обеспечиваются регулировкой и меньшей рабочей поверхностью.

2. Из зависимости (2.27) с учетом (2.26 и 2.16) устойчивого движения зерновок по дну подающих бороздок без качения определяется радиус приемного пояса дисковой пары

$$R_0 = \frac{Q}{2\pi d_э V_{пр} \rho \Psi}, \tag{4.7}$$

а так же число вырезов k и дуг разгона $l_в$ на торце дозирующего цилиндра по зависимости (2.28).

$$k = \frac{2\pi \cdot R_ц}{S + l_в} \tag{4.8}$$

3. По заданной (требуемой) производительности (подаче) Q и полученному значению $R_п$, из геометрических соображений, ставим в соответствие

$$F_{раб} = \pi(R_н^2 - R_0^2) \tag{4.9}$$

и определяем величину наружного радиуса дисков по формуле

$$R_н = \sqrt{\frac{F_{раб} + \pi R_0^2}{\pi}}\text{, мм} \qquad (4.10)$$

4. Задавшись значением коэффициента измельчения, перехода между подающим и модульным поясами λ, с учетом зависимости (2.38), определяем величину радиуса модульного пояса $R_м$.

$$R_м \sqrt{\frac{R_н^2 + \lambda R_0^2}{1+\lambda}}\text{, мм} \qquad (4.11)$$

5. Зная величину $R_м$, рассчитываем площади подающих бороздок и площадок релаксации (удержания) деформации $F_A^б$ и $F_B^к$ соответственно (рис 2.14) по зависимости (2.36).

$$F_A^б = \frac{\pi\left(R_M^2 - R_0^2\right)}{\left(\lambda+1\right)}, \qquad (4.12)$$

и

$$F_B^к = \frac{\pi\left(R_M^2 - R_0^2\right)\lambda}{\left(\lambda+1\right)}. \qquad (4.13)$$

6. По полученным радиусам $R_п$, $R_м$ и $R_н$ определяем величины поверхностей подающего и модульного поясов (2.37, 2.38) и (рис 2.14).

$$F_п = F_{AB} = \pi(R_M^2 - R_0^2) \qquad (4.14)$$

$$F_м = F_C = \pi(R_н^2 - R_м^2) \qquad (4.15)$$

7. С учетом форм эпюр напряжений на подающих бороздках и площадках релаксации (рис 2.16) определяем силы сжатия потоков по зависимостям (2.43, 2.44):

для бороздок подающего пояса

$$P_б = \sigma_п \frac{\pi(R_м^2 - R_0^2)}{2(\lambda+1)}\psi_б, \qquad (4.16)$$

для классификаторов подающего пояса

$$P_к = \sigma_к \frac{\pi(R_м^2 - R_0^2)\lambda}{(\lambda+1)}\psi_к \qquad (4.17)$$

По аналогии с приемным поясом находим усилия на элементах модульного пояса:

для бороздок модульного пояса

$$P_{м} = \sigma_{м} \frac{\pi(R_{н}^2 - R_{м}^2)}{2(\lambda_1 + 1)} \psi_{м} \tag{4.18}$$

для площадок модульного пояса

$$P_{км} = \sigma_{м} \frac{\pi(R_{н}^2 - R_{м}^2)}{(\lambda_1 + 1)} \cdot \lambda_1 \psi_{км} \tag{4.19}$$

При работе измельчителя только на мелком помоле и β подъема канавок модульного пояса равном 0 усилие сжатия потока определится по упрощенной зависимости (2.45)

$$P_{м} = \pi(R_{н}^2 - R_{м}^2)\Psi_{м} \tag{4.20}$$

8. Мощность $N_{пр}$ на процесс деформации и классификации продуктов измельчения до заданных λ_1 и λ_2 в рабочем пространстве дисковой пары, без учета транспортной и вентиляционной составляющих составляет

$$N_{пр} = \left[(P_{\delta} + P_{к}) \frac{R_{м} + R_0}{2} + P_{м} \frac{R_{н} + R_{м}}{2} \right] \omega_0 f \tag{4.21}$$

В соответствии с методикой расчета определены параметры дисковых пар измельчителей модельного ряда (Приложение) для рабочих поверхностей от (0,1…1,0) м^2.

Значение показателей граф 10-12 (Приложение) приведены по удельным показателям, полученным на рабочей модели Q=500 кг/ч. При измельчении пшеницы сорта Юка урожая 2014 г. (табл 4.11)

Таблица 4.12

Удельные показатели рабочей модели дискового измельчителя

Помол	Модуль помола	Удельная производительность, кг/м^2	Удельная энергоемкость кВт·ч/т
Мелкий	0,76	4.921	2,99
Средний	1,69	11,467	1,89
Крупный	2,28	18,003	1,14

4.4 Выводы по главе

Основываясь на результатах проведенных экспериментальных исследований процесса измельчения грубых кормов дисковым рабочим органом можно сделать следующие выводы:

1. Дисковый рабочий орган измельчителя кормового зерна является универсальным, способным измельчать зерновки злаковых и бобовых культур, обеспечивая содержание заданной фракции более 86% от общего объема.

Заданная фракция при мелком, среднем и крупном модуле помола составит:

$M_{мелкий}(0,68)=83,76\%$

$M_{средний}(1,69)=86,05\%$

$M_{крупный}(2,58)=97,89\%$

При этом содержание фракции менее 1 мм не превышало 1,2%

2. Результаты исследований методом планирования экспериментов позволили получить уравнения регрессии процесса измельчения зерна и оценить влияние факторов на характер его протекания. При этом результаты расчетов с помощью полученного уравнения показали достаточно высокую сходимость расчетных и экспериментальных значений критерия оптимизации. (расхождение значений не превышает 10%)

3 Для получения оптимального модуля помола в процессе измельчения можно рекомендовать:

- зазор междискового пространства должен быть установлен 0,25…0,75 мм.

- влажность зерна 12…16%

- частота вращения диска 600…1000 об/мин

4. Для повышения степени измельчения зерна дисковым рабочим органом достаточно увеличить модульный пояс относительно подающего.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ КОРМОВОГО ЗЕРНА

Расчет экономической эффективности применения разработанного дискового измельчителя кормового зерна проводится на основании действующих методик, стандартов и нормативных документов с учетом среднегодового уровня инфляции [120, 121, 122].

Основными показателями экономической оценки применения дискового измельчителя кормового зерна являются повышение продуктивности животных (привесов животных и удоев), получение дополнительной прибыли от реализации дополнительной продукции, а также получаемый на предприятии годовой эффект в виде чистого дисконтированного дохода (ЧДД) [124].

Сельскохозяйственные предприятия в настоящее время работают в условиях рыночной экономики и инфляции. Чистый дисконтированный доход определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу (году, кварталу, месяцу), или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами [124].

$$ЧДД = \sum_{i=0}^{T}(P_t - И_{эt})\frac{1}{(1+E_p)^t} - K \qquad (5.1.)$$

или

$$ЧДД = -К + (P - И_э) \cdot К_{сд} \qquad (5.2.)$$

где P_t – результаты, достигаемые на шаге расчета t, *руб.*;

$И_{Эt}$ – эксплуатационные затраты на шаге расчета t без учета капиталовложений, *руб.*;

T – горизонт расчета, *лет*;

$К$ – сумма дисконтированных капиталовложений, *руб.*;

$К_{сд}$ – коэффициент суммы дисконтирования, рассчитываемый по формуле:

$$K_{сд} = \sum_{i=0}^{T} \frac{1}{(1+E_p)^t} \quad (5.3)$$

где E_P – норма дисконта капитала с поправкой на инфляцию; является реальной процентной ставкой, которая учитывает инфляцию:

$$E_p = \frac{1+E}{1+r} - 1 \quad (5.4)$$

где r – уровень инфляции, %;

E – ставка процента банка, %.

Сумма дисконтированных капиталовложений рассчитывается по формуле:

$$K = \sum_{t=0}^{T} K_t \frac{1}{(1+E)^t} \quad (5.5)$$

где K_t – капиталовложения на шаге расчета *t*, руб.

При определении коммерческой эффективности используется показатель потока реальных денег, другое название Cash Flow. Потоком реальных денег $Ф_t$ называется разность между притоком ($П_t$) и оттоком ($О_t$) денежных средств на каждом шаге расчета.

Капитальные вложения в базовый вариант (измельчитель зерна), определяется по формуле:

$$K_б = Ц \cdot к \quad (5.6)$$

где $K_б$ – капитальные вложения в базовый вариант машины-эталона, *руб.*;

$Ц$ – цена приобретения оборудования, *руб.*;

$к$ – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на транспортировку, монтажные и снабженческо-торговые расходы.

Капиталовложения в предлагаемый вариант машины (дисковый измельчитель кормового зерна) включают в себя затраты на приобретение материалов, доставку и монтаж, которые рассчитываются по формуле:

$$K_{пр} = M + ТЗ + C_з + ОП + ОХ \quad (5.7)$$

где M – затраты на материалы и покупные изделия, *руб.*;

$ТЗ$ – транспортно-заготовительные расходы, *руб.*;

$C_з$ – затраты на оплату труда с начислениями на изготовление оборудование, *руб*.

Транспортно-заготовительные расходы определяются в процентах от стоимости покупных материалов и изделий:

$$ÒÇ = \frac{Ì \cdot \mu_{òð}}{100} \quad (5.8)$$

где $ТЗ$ – транспортно-заготовительные расходы, *руб.*;

$\mu_{тр}$ – процент транспортно-заготовительных расходов (по фактическим данным предприятия, составляет 20%).

Затраты на оплату труда при изготовлении дискового измельчителя кормового зерна определяются по формуле:

$$C_З = ОТ_{осн} \cdot a_п \cdot a_{доп} \cdot a_{отн} \quad (5.9)$$

где $ОТ_{осн}$ – основная оплата труда, *руб.*;

$a_п$ – коэффициент, учитывающий премии по фонду оплаты труда, принимается в размере 1,2…1,4;

$a_{доп}$ – коэффициент, учитывающий размеры дополнительной оплаты труда, принимается в размере 1,12…1,18;

$a_{отн}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на все виды страхования, принимается 1,30.

Основная оплата труда зависит от трудоемкости работ и часовой тарифной ставки соответствующих разрядов персонала:

$$ОТ_{осн} = Т_{ем} \cdot \tau_{час} \quad (5.10)$$

где $Т_{ем}$ – трудоемкость монтажных работ, необходимых для изготовления дискового измельчителя кормового зерна, *чел.–ч.*;

$\tau_{час}$ – основная ставка работника квалификационной группы соответствующего квалификационного уровня за 1 час работы, *руб*.

Общепроизводственные и общехозяйственные расходы определяются в процентах от основной зарплаты на изготовление оборудования:

$$ОП = \frac{ОТ_{тар} \cdot \mu_{оп}}{100} \quad (5.11)$$

где $\mu_{оп}$ – процент общепроизводственных расходов (по данным предприятия составляет 250%).

$$ОХ = \frac{ОТ_{тар} \cdot \mu_{ох}}{100} \quad (5.12)$$

где $\mu_{ох}$ – процент общехозяйственных расходов (по данным предприятия составляет 410%).

Годовые эксплуатационные затраты на содержание оборудования исчисляются по формуле:

$$И_э = З + А + Т_р + С_э + П_р \quad (5.13)$$

где $Ç$ – годовой фонд заработной платы, *руб*.;

$À$ – амортизационные отчисления, *руб*.;

$Ò_ð$ – затраты на ремонты и техническое обслуживание, *руб*.;

$Ñ_ý$ – годовые затраты на электроэнергию, *руб*.;

$Ï_ð$ – прочие затраты, *руб*.;

Годовой фонд заработной платы обслуживающего персонала рассчитывается по формуле:

$$З = (Т_{год} \cdot \tau_{час}) \cdot a_п \cdot a_{доп} \cdot a_{отн} \quad (5.14)$$

где $Т_{год}$ – годовая трудоемкость работы, *чел.–ч.*

Годовая трудоемкость работы работника в базовом и предлагаемом вариантах, определяется по формуле:

$$Ò_{ãîä} = Ò_{äí} \cdot t \cdot Z \qquad (5.15)$$

где $Ò_{äí}$ – число дней работы в году;

t – продолжительность работы в день, *ч.*;

Z – количество обслуживающего персонала, *чел.*

Амортизационные отчисления определяем по формуле:

$$A = \frac{K \cdot H_a}{100} \qquad (5.17)$$

где K – балансовая стоимость (капиталовложения) оборудования, *руб.*;

H_a – норматив годовых амортизационных отчислений по оборудованию, %;

Отчисления на ремонт и техническое обслуживание определяют, укрупнено по выражению:

$$T_p = \frac{K \cdot H_p}{100} \qquad (5.18)$$

где H_p – норматив годовых отчислений на ремонт и техническое обслуживание по оборудованию (по усредненным данным бух. отчетности за последние 3 года), %.

Затраты на потребленную электроэнергию определим по формуле:

$$\tilde{N}_{ý} = \frac{Ð \cdot t \cdot Ä \cdot Ò_{ý}}{\eta}; \qquad (5.19)$$

где P – мощность оборудования, кВт.;

t – продолжительность работы оборудования в день, ч.;

$Д$ – число дней работы оборудования в году, дней;

$T_э$ – стоимость 1 кВт-ч электроэнергии, руб.;

η – кпд потребителя.

Прочие прямые затраты рассчитываются по формуле:

$$Пр = (0{,}05...0{,}1) \cdot (З + А + Т_р + С_э) \quad (5.22)$$

Удельные эксплуатационные затраты рассчитываются по формуле:

$$И_{уд} = \frac{И_э}{ВП}; \quad (5.23)$$

где $И_э$ – эксплуатационные затраты, руб.;

$ВП$ – выход валовой продукции (годовой удой молока от рассматриваемого поголовья коров), т.

Годовой удой молока от рассматриваемого поголовья коров рассчитывается по формуле:

$$ВП = П_к \cdot у_{год} \quad (5.24)$$

где $П_к$ – среднегодовое количество коров, гол.;

$у_{год}$ – годовой удой от одной коровы, т.

Степень снижения удельных эксплуатационных затрат определяется по формуле:

$$С_т = \frac{И^б_{уд} - И^{пр}_{уд}}{И^б_{уд}} \cdot 100\%, \quad (5.25)$$

где $С_т$ – степень снижения удельных эксплуатационных затрат, %.

Годовая экономия эксплуатационных затрат:

$$Э_и = (И^б_{уд} - И^{пр}_{уд}) \cdot ВП_{пр}, \quad (5.26)$$

где $ВП_{пр}$ – годовой выход молока при использовании разработанного дискового измельчителя кормового зерна, %.

Чистая прибыль предприятия за вычетом 20% налога на прибыль определяется по формуле:

$$П_ч = Э_и - Э_и \cdot \alpha_н; \quad (5.27)$$

где $\alpha_н$ – коэффициент, учитывающий налоговую ставку на прибыль.

Энергоемкость производимой продукции определяется по формуле:

$$F_y = \frac{F_г}{ВП}, \quad (5.28)$$

где F_y – энергоемкость единицы произведенной продукции, кВт.-ч./т.;

$F_г$ – годовое потребление электроэнергии, кВт.-ч.

Степень снижения энергоемкости (C_F) определяется по формуле

$$C_F = \frac{F_y^б - F_y^{пр}}{F_y^б} \cdot 100\%, \quad (5.29)$$

где C_F – степень снижения материалоемкости, %;

$F_y^б; F_y^{пр}$ – удельная энергоемкость операций в базовом и предлагаемом вариантах соответственно, кВт.-ч /т.

Удельная материалоемкость операции определяется по формуле:

$$M_y = \frac{\sigma}{ВП} \quad (5.30)$$

где M_y – удельная материалоемкость операции, кг/т;

$ВП$ – годовой выход продукции, т;

σ масса машины, кг.

Степень снижения материалоемкости (C_M) определяется по формуле

$$C_M = \frac{M_{Уб} - M_{У пр}}{M_{Уб}} \cdot 100, \quad (5.31)$$

где C_M – степень снижения материалоемкости, %;

$M_{Уб}; M_{У пр}$ – удельная материалоемкость операций в базовом и предлагаемом вариантах соответственно, кг/т.

Коэффициент (индекс) доходности капиталовложений в предлагаемое оборудование определяется по формуле:

$$ИД = \frac{ЧДД}{К_{пр}}, \qquad (5.32)$$

где $ÈÄ$ – коэффициент доходности капиталовложений;

$К_{пр}$ – размер капиталовложений в предлагаемое оборудование, руб.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета экономической эффективности использования дискового измельчителя кормового зерна

№ п/п	Показатели	Условные обозначения	Значения
1	2	3	4
1	Затраты на материалы и покупные изделия для изготовления дискового измельчителя кормового зерна, *руб*	$М$	22540
2	Трудозатраты на изготовление конструкции по видам работ, *чел.–ч.* • сварочные	$Т_{ем}$	7
	• токарные		14
	• фрезерные		14
	• слесарные (сборочные)		16
3	Часовая основная ставка, *руб.*: • сварочных работ	$\tau_{час}$	37,39
	• токарных работ		38,12
	• фрезерных работ		36,05
	• слесарных (сборочных) работ		36,05
4	Число дней работы в году оборудования на выполнение технологической операции, *дней*	$Òäí$	360
5	Производительность за час чистого времени, *кг*: • базового оборудования • предлагаемого оборудования	$W_ч$	700 500
6	Среднегодовое поголовье коров, *гол.*:	$П_к$	1000

7	Среднегодовой норматив потребления в день зерновых в расчете на одну корову, *кг./гол*:	$w_{дн}$	2,8
	Дневной объем работы для измельчения зерна, т	$W_{дн}$	2,8
8	Продолжительность работы в день на выполнение технологической операции – измельчение кормового зерна, *ч.* • базового варианта • предлагаемого варианта	t	 4,0 5,6
9	Количество обслуживающего персонала занятых на выполнение технологической операции, *÷äë*	Z	1
10	Масса оборудования, *кг*: • базового • предлагаемого	σ	 150 70
11	Мощность оборудования, *кВт*; • базового варианта • предлагаемого варианта	P	 4,0 1,6
12	Норматив годовых амортизационных отчислений, %:	$Í_{à}$	14,3
13	Норматив годовых отчислений на ремонты и ТО, %	$Í_{ð}$	16,0
14	Стоимость 1 $кВт \cdot ч$ электроэнергии, *руб*.	$T_{э}$	3,98
15	Среднегодовой удой от одной коровы, *кг.*; • базового варианта • предлагаемого варианта	$y_{год}$	 6800 7200
16	Норма доходности (банковская кредитная ставка), %	E	18,0
17	Годовой уровень инфляции, %	r	6,5

Таблица 5.2 – Сводные показатели экономической эффективности использования дискового измельчителя кормового зерна

№ п/п	Показатели	Ед. измерения	Варианты	
			базовый измельчитель	предлагаемый измельчитель
1	2	3	4	5
1.	Суммарные капиталовложения	*руб*.	136400	43260
2.	Годовые эксплуатационные затраты в том числе:	*руб*.	179841,89	183504,022

	• оплата труда с начислениями на социальные нужды	*руб.*	105817,42	148144,389
	• амортизационные отчисления	*руб.*	19505,20	6186,18
	• затраты на ремонты и техническое обслуживание	*руб.*	21824,00	6921,60
	• затраты на потребляемую электроэнергию в том числе:	*руб.*	24131,368	13513,57
	• прочие затраты	*руб.*	8563,90	8738,29
3.	Годовой выход продукции (годовой удой молока)	*т.*	6800,0	7200,0
4.	Удельные эксплуатационные затраты в том числе:	*руб./т.*	26,45	25,49
	• оплата труда с начислениями на социальные нужды	*руб./т.*	15,56	20,58
	• амортизационные отчисления	*руб./т.*	2,87	0,86
	• затраты на ремонты и техническое обслуживание	*руб./т.*	3,21	0,96
	• затраты на потребляемую электроэнергию	*руб./т.*	3,55	1,88
	• прочие затраты	*руб./т.*	1,26	1,21
5.	Степень снижения удельных эксплуатационных затрат	%	–	3,63
6.	Годовая экономия удельных эксплуатационных затрат	*руб./т*	–	0,96
7.	Годовая экономия эксплуатационных затрат	*руб.*	–	6916,80
8.	Чистая прибыль (после уплаты налога на прибыль 20%)	*руб.*	–	5533,44
9.	Удельная энергоемкость процесса в расчете на одну тонну молока	*кВт – ч./т*	0,89	0,47
10.	Степень снижения удельной энергоемкости на одну тонну молока	%	–	47,11
11.	Удельная энергоемкость процесса в расчете на тонну	*кВт – ч./т*	6,02	3,37

	кормового зерна			
12.	Степень снижения удельной энергоемкости в расчете на тонну кормового зерна	%	–	44,00
13.	Удельная материалоемкость	*кг./т*	0,022	0,010
14.	Степень снижения материалоемкости	%	–	55,93
15.	Чистый дисконтированный доход (в расчете за 7 лет)	*руб.*	–	119385,61
16.	Коэффициент (индекс) доходности капиталовложений	–	–	2,76

Примечание: экономический эффект дан в ценах четвертого квартала 2014 года.

Воспользовавшись выражениями (5.3) и (5.4) определяем коэффициент суммы дисконтирования, значение которого, подставляя в уравнение (5.2) позволяет определить чистый дисконтированный доход:

$$ЧДД = 93140 + 5533{,}44 \cdot 4{,}7430907 = 119385{,}61 \ \ руб.$$

Таблица 5.3 – Результаты расчета чистого дисконтированного дохода при $E = 18\%$, $r = 6{,}5\%$

Показатели	Годы							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Приток, *руб.*	93140	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44
Отток, *руб.*	–	–	–	–	–	–	–	–
Cash Flow, *руб.*	93140	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44	5533,44
$(1+E_p)\wedge(-t)$	1,00	0,9025	0,8146	0,7352	0,6635	0,5989	0,5405	0,4878
Cash Flow* $(1+E_p)\wedge(-t)$ *руб.*,	93140	4994,16	4507,44	4068,16	3671,69	3313,85	2990,89	2699,41
ЧДД, *руб.*	93140	98134,2	102641,6	106709,8	110381,5	113695,3	116686,2	119385,6

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Использование предложенной научной гипотезы позволило создать оригинальные рабочие органы дискового типа с тремя поясами деформации, которые обеспечили получение необходимого модуля помола кормового зерна для крупного рогатого скота и выровненного гранулометрического состава продукта от 85 до 96%.

2. Определением мгновенного и длительного модулей упругости, выполненным с усилием 0,30-0,35 разрушающего установлены значительные 33-41% коэффициенты вариации их значению в пределах сортов ячменя, пшеницы и более 45% между сортами (после 3-х месяцев хранения в горизонтальных хранилищах и подработки) и находились в диапазоне H (21,18/17,9) МПа, E (7,06/7,34) Мпа.

3. Разрушающие усилия в диапазоне влажностей (10,8-15,2) длительного хранения находились в пределах: ячмень – (6,75-7,11); пшеницы – (6,47-6,62); овес – (3,91-4,03), горох (нут) – (4,55-7,80) и снижались увеличением влажности на 1% на, (1,7…2,3)%.

4. Применение дозатора-распределителя работающего в трех диапазонах подачи, позволило исключить заторы продукта в приемном поясе междискового пространства.

5. Получены теоретические зависимости для согласования геометрических и кинематических параметров дозатора-распределителя в формулах (1,2), условия беззаторной подачи однозернового слоя в приемный конус (3), соотношения площадей бороздок $F_б$ и классификаторов $F_к$ подающего пояса в формулах (4,5), обеспечивающих последовательное наращивание дефектов прочности с заданным уровне деформации λ на выходе в модульный пояс и радиусами поясов и наружным радиусом дисков $R_д$=270…295. Что позволило снизить энергоемкость процесса в 2 раза.

6. С учетом упруго-вязких свойств зерновок получены зависимости определения напряжений деформации (8,9), рабочих усилий на элементах междискового пространства (10-12) и мощности на процесс деформации и классификации продуктов измельчения по заданному δ, что позволило рекомендовать глубину бороздок в модульном поясе h_δ от 0,5 до 1,8 мм; ширину $в$=от 8 до 14 мм.

7. В результате реализации полнофакторного эксперимента ПФЭ 2^3 обоснованы рациональные параметры и режимы работы дисковой пары измельчителя:

– частота вращения подвижного диска, 600 мин$^{-1}$;

– зазор в модульном поясе δ=0,25; 0,5; 0,75, что обеспечило получение помола: мелкого – 0,68; среднего – 1,69; крупного – 2,59.

– подача 6000 кг/м^2

При этом энергоемкость процесса при стандартных модулях помола составла $А_{уд}$: мелкий (0,68)=1,86 кВт·ч/т; средний (1,69)=1,64 кВт·ч/т; крупный (2,58)= 1,4 кВт·ч/т.

8. Применение дискового измельчителя кормового зерна для приготовления комбикормов на молочно товарной ферме СПК «колхоза имени С.Г. Шаумяна» позволило хозяйству получить чистый дисконтированный доход (в расчете за 7 лет) в размере 119385,61 рублей от экономии электроэнергии и повышения удоя с 6800 до 7200 литров молока. За аналог приняли серийно выпускаемый дисковый измельчитель Я.31.56.00.00.005

Литература.

1. Сысуев, В.А. Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства Северо-Восточного региона Европейской части России на 2002.2010 гг. / В.А. Сысуев, В.И. Кряжков, В.И. Сыроватка и др. Киров, 2002. - 136 с.

2. Лачуга Ю.Ф. Стратегия Машинно-технического обеспечения производства сельскохозяйственной продукции / Ю.Ф. Лачуга.//Техника в сельском хозяйстве, №1,2004.

3. Кормановский Л.М. Точные технологии в животноводстве: состояние и перспективы/Л.П. Кормановский// Техника в сельском хозяйстве, №1,2004.

4. Краснощеков Н.В. Инновационное развитие сельскохозяйственного производства России.-М.:ФГНУ «Росинформагромтех», 2009.-388с.

5. Першукевич П.М. Аспекты модернизации агропромышленного производства на инновационной основе / П.М. Першукевич, И.П. Першукевич, С.А. Грибоаский. // Достижения науки и техники АПК, №3 – 2012 – с.3-6.

6. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. – 2-е изд., перераб. И доп. – Л.: Колос. Ленингр. Отд-ние, 1980. – 168 с., ил.

7. Мельников С.В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками. Диссертация на соискание ученой степени доктора техн.наук. Л.:1969.

8. Ребиндер П.А. Физико-химические исследования процессов деформации твёрдых тел / П.А. Ребиндер // Сборник АН СССР. 4.1. М.; Л.: 1947

9. Сыроватка В.И., Бледных В.В., Сергеев Н.С. Результаты резания фуражного зерна. // Доклады РАСХН №3. М.:2008.

10. Наймушин А.А., Хозяев И.А. Модель размола зерна пшеницы с учетом его молекулярного строения. // Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК. 2013. С.179-188.

11. Макаров, А.П. Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках // Электрификация сельского хозяйства: Научные труды ВИЭСХ. М., 1964. - С. 66 – 87.

12. Сыроватка В.И. Основные закономерности процессы измельчения зерна в молотковой дробилке.// Электрификация сельского хозяйства: Научные труды ВИЭСХ. М., 1964. - С. 89 - 157.

13. Федоренко И.Я., Золоторев С.В., Смышляев А.А. Математическая модель разрушения зерна ударом // Математическое моделироание в сельскохозяйственном производстве: Труды XII Байкальской Международной конференции «Методы оптимизации и их приложения».– Иркутск:Изд-во ИрГСХА,2001.–Том8.–С.109 – 112.

14. Коваленко В.П. Механизация технологических процессов в животноводстве/ В.П. Коваленко, И.М. Петренко. – Краснодар, Агропромполиграфист, 2003.– 432.

15. Иванов В.В., Гуриненко Л.А., Семенихин А.М., Шкондин В.Н. Двухступенчатый измельчитель кормового зерна.- В сб.: Инновационные разработки для АПК.- Часть II.- Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2014.- С.-44-49.

16. Мельников С.В., Фарбман Г.Я. Исследование процесса прессования кормовых смесей. — «Механизация и электрификация социалистическоо сельского хозяйства», 1964, № 5, с. 36—38.

17. Долгов И.А. Некоторые вопросы теории прессования сена и соломы с применением пуансонов. — Труды ВИСХОМа, вып. 39, М., 1962, с. 57—74.

18. Александров Е.В., Соколинский О.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М., «Наука», 1969. 199 с.

19. Мельников С.В. Механизация животноводческих ферм / С.В. Мельников, Б.И. Вагин, П.А. Андреев и др. // М.: «Колос», 1969. – 440 с.

20. Смирнов И.И. Машины для животноводческих – ферм теория, конструкция, расчет/ И.И. Смирнов. – М.: МАШГИЗ, 1959, – 359 с.

21. Особенности деформации зерна рабочими органами измельчителей / В.В. Иванов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (научный журнал КубГАУ). Краснодар: КубГАУ, 2014. №3 (097) [Электронный ресурс]. URL: http://ej.kubagro.ru/2014//03/pdf (дата обращения: 20.06.2014).

22. Ржаницын А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени / А.Р. Ржаницын. – М. – Л.: Гостехиздат, 1949. – 252 с.

23. Долгов И.А. Математические методы в земледельческой механике / И.А. Долгов, Г.К. Васильев. – М.: Машиностроение, 1967. – 204 с.

24. Бутковский, В .А. Технология мукомольного и комбикормого производства (с основами экологии) / В А. Бутковский, Е.М. Мельников. М.: Агропромиздат, 1989. — 464 с.

25. Опрышко В.М. Сравнительная оценка качества продукта при измельчении при измельчении в молотковой дробилке и ударно-центробежном измельчителе / В.М. Опрышко, В.В. Труфанов, С.И. Щедрин, В.В. Ляпин / Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение: Межвузовск. сборник науч. труд. – Вып. 3. – Воронеж, 2007. – с. 267-269.

26. Беркович, В.А. Исследование влияния технологических факторов на зерновой состав и форму продуктов дробления одноротorных дробилок / В.А. Беркович // Ленинград горн, ин-т имени им. Плеханова. — 1973. №4 — С. 1—72.

27. Драгилев, А.И. Технологическое оборудование предприятий перерабатывающих отраслей / А.И. Драгилев, В.С. Дроздов. М.: Колос, 2001. -352 с.

28. Денисов, В.А. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в высокоскоростной центробежной дробилке и обоснование режимов ее работы : Дис. .канд. техн. наук / В.А. Денисов. М., 1979. - 215 с.

29. Денисов, В.А. Повышение эффективности процесса измельчения зерновых компонентов комбикормов: Автореф. дис. . докт. техн. наук / В.А. Денисов. -М., 1992. -32 с.

30. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. – М.: ГНУ ВНИИМЖ, 2010. – 248 с.

31. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – Л. Колос. Ленинград отделение. 1978.–560 с.

32. Пахомов В.И. Обоснование инновационной технологии и комплекса машин для производства и раздачи многокомпонентных обогащенных и обеззараженных зерновых хлопьев повышенной питательности для животных / В.И. Пахомов, М.А. Тищенко, С.В. Брагинец, М.В. Чернуцкий // В сб.: Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК.– Част II.– Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2013.– с. 38-49.

33. Сельскохозяйственная техника :кат. Т.4. Техника для животноводства.– М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008.– 336 с.

34. КобаВ.Г../Механизация технологии производства продукции животноводства. /В.Г.Коба, Н.В.Брагинец, Д.Н.Мурусидзе, В.Ф.Некрашевич.//М.:Колос,1999.-528 с.

35. Елисеев, В.А. К вопросу определения энергии затрачиваемой в процессе размола зерна / В.А. Елисеев // Тр. зап. Воронежского СХИ. - Воронеж, 1959. Т.21, вып.2. - С. 271-274.

36. Сыроватка, В.И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке / В.И. Сыроватка // Научные Труды / ВИЭСХ. - 1964, С. 38-52.

37. Сысуев, В. Оборудование для переработки зерна / В. Сысуев, П. Савиных, В. Халтурин // Комбикормовая промышленность. 1997. — №5. - С. 13-14.

38. Леонтьев, П.И. Технологическое оборудование кормоцехов / П.И. Леонтьев, В.П. Земсков, В.М. Потемкин. М.: Колос, 1984. - 158 с.

39. Леонтьев, П.И. К вопросу об измельчении зерна / П.И. Леонтьев, С.В. Золотарев // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. -1984.-№7. -С. 50.

40. Хорошенко Г. Современная концепция измельчения с использованием техники завтрашнего дня / Г. Хорошенко // Комбикорма. 2002. - №1. - С. 26-28.

41. Кукта Г.М. Технология переработки и приготовления кормов / Г.М. Кукта // Кормопроизводство. 1992. - №3. - С. 6-7.

42. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов. / Г.М: Кукта М.: Агропромиздат, 1987. - 303 с.

43. Пахомов, В .И. Обоснование технологического проектирования блоч-но-модульных внутрихозяйственных комбикормовых предприятий : Дисс. . докт.техн.наук / В.И. Пахомов. Зерноград, 2001. - 445 с.

44. Соболева, О.С. Цены на продовольствие в 3 квартале 2012 года и особенности мясного рынка / О.С. Соболева // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2012.– №12.– с. 67-73.

45. Перекопский А.Н., Баранов Л.Н. Технологические решения производства плющенного фуражного зерна в Ленинградской области /Актуальныепроблемы инженерного обеспечения АПК. Часть III. Сб. науч. тр. Ярославль: ЯГСХА, 2004, - С.

46. Ромалийский В.И. Исследование процесса плющения и обоснование параметров плющилки и режимов обработки консервированного зерна. Ав-тореф. . канд. техн. наук. -М., 1978.

47. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – Л.: Колос. Ленинград отделение. 1978. – 560 с.

48. Иванов В.В. Физико-механические предпосылки снижения энергоемкости процесса измельчения зерна / Л.А. Гуриненко, В.В. Иванов, А.М. Семенихин и др. // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК. сборн. науч. статей по материалам V Международной научно-практической конференции, Ставрополь. – АГРУС, 2010 – с. 67-71.

49. Иванов В.В., Семенихин А.М., Гуриненко Л.А., Геометрия и кинематика дисковой пары измельчителя зерна // Совершенствование технологических процессов и технических средств в АПК. 2011. №9. С. 141-146.

50. Иванов В.В., Семенихин А.М., Гуриненко Л.А. Особенности измельчения зерна дисковой парой // Вестник аграрной науки Дона. 2012. №1(17). С. 10-14.

51. Иванов В.В., Семенихин А.М., Гуриненко Л.А. Геометрические параметры рабочей зоны дисковой пары ступенчатого измельчителя зерна // Вестник аграрной науки Дона. 2012. №4(20). С. 10-14.

52. Иванов В.В., Семенихин А.М., Гуриненко Л.А. Обоснование факторной модели энергетики дискового измельчителя зерна // Совершенствование технологических процессов и технических средств в АПК. 2014. №10. С. 18-22.

53. Смышляев А.А. Совершенствование рабочего процесса центробежного измельчителя фуражного зерна/ Автореф. дис…. канд. техн. наук / Алтайский государственный технический университет им. Ползунова. – Барнаул, - 2002г. – 23 с.

54. Ляпин В.В. Совершенствование рабочего процесса ударно-центробежного измельчителя / Автореф. дис…. канд. техн. наук / Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки. – Воронеж, - 2009. – 18с.

55. Федоренко И.Я. Влияние числа ударов, необходимых для разрушения зерна, на энергетику процесса измельчения / И.Я. Федоренко, С.В. Золотарев, А.А. Смышляев // хранение и переработка сельхоз сырья. – 2001. – №6.с. 53-54.

56. Шполянская А.Л. Исследование механических свойств зерна при статическом и ударном сжатии. Диссертация на соискание зерна ученой степени кандидата тех. наук. М.:1947.

57. Ляпин В.В. Оценка качества продукта при измельчении ударно – центробежном измельчителе / В.В. Ляпин // Достижение молодых ученых – будущее в развитии АПК: Материалы межрегиональной научно практической конференции молодых ученых. – Ч.II. - Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2007. – С.267-269.

58. Коротков, В.Г. Математическая модель измельчителя зерна ударно-истирающего действия / В.Г. Коротков, В.Ю. Полищук, С.В. Антимонов // Техника в сельском хозяйстве. № 1 — 2001.

59. Тишин, В. Центробежная многоступенчатая дробилка / В. Тишин, В. Здобнов, В. Денисов // Комбикормовая пром-ть. 1989. - №5. - С. 22-25.

60. Золотарёв, С.В. Механико-технологические основы создания ударно-центробежных измельчителей фуражного зерна : Автореф. дис. .докт. техн. наук / С.В. Золотарёв. Барнаул, 2002. - 49 с.

61. Кретов И.Т. Технологическое оборудование предприятий пищекон-центратной промышленности / И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.М. Кравченко // Учебник. Воронеж: Изд. Воронежского университета, 1996. - 448 с.

62. Гуриненко Л.А. Совершенствование процесса уплотнения силосной массы в горизонтальных хранилищах: Дис. канд. техн. наук, Зерноград, 2007 С. 54-57, (185) с.

63. Семенихин А.М. Сенаж и силос в траншеях: монография / А.М. Семенихин, Е.Б. Сафиулина, Л.А. Гуриненко и др; под. ред. А.М. Семенихина.- Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2012.- с. 73-76 и 102-105; (202с.).

64. Пикуза, Н.Ф. Машины для приготовления комбинированных и концентрированных кормов (теория и расчеты) / Н.Ф. Пикуза. Ростов-на-Дону : Ин-т с.-х. машиностроения, 1973. - 165 с.

65. Сергеев, Н.С. Новая конструкция и рабочий процесс центробежно-роторного измельчителя фуражного зерна / Н.С. Сергеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. - №6. - С. 30-31.

66. Шагдыров, И.Б. Обоснование параметров многоступенчатой дробилки фуражного зерна : дисс. . канд. техн. наук. / И.Б. Шагдыров. Челябинск, 1988. -220 с.

67. Иванов В.В., Гуриненко Л.А., Семенихин А.М., Ященко В.В. Параметры решетчатого сепаратора дискового измельчителя кормового зерна. .- В сб.: Инновационные разработки для АПК.- Часть II.- Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2014.- С.-50-55.

68. Листопад Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины/Г.Е.Листопад, Г.К.Демидов, Б.Д. Зонов и др.; Под общ. ред Г.Е. Листопад. – М.: Агропроиздат, 1986. – с.578-592.(688с).

69. Летошев М.Н. Сельскохозяйственные машины, издание третье, переработано и добавлено, - Государственное издательство с/х литературы, М.:- Л.:,.1955, - с.611-614. ил.

70. Труфанов В.В. Центробежный измельчитель / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, М.Н. Яровой, В.В. Лянин // Сельский механизатор. – 2008. – №4. – с. 40.

71. Труфанов В.В. Ударно-центробежный измельчитель фуражного зерна / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, В.В. Ляпин // Мировой опыт и перспективы развития сельского хозяйства: Материалы международной конференции, посвященной 95 – летию Воронежского аграрного университета. – Ч.I. – Воронеж: ФГОУ ВПО ВГАУ, 2008. – С. 157 -159.

72. Сергеев Н.С. Центробежно – роторные измельчители фуражного зерна. Диссертация на соискание ученой степени док.тех.наук. Челябинск, 2008.

73. Золотарев, С.В. Исследование и разработка конструкции центробежно – ударного измельчителя зерна/Золотарев С.В. Смышляев А.А. // Развитие села и социальная политика в условиях рыночной экономики: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию МГАУ. – М.: МГАУ имени В.П. Горячкина,2000. – с.134-136.

74. Федоренко И.Я., Золоторев С.В., Смышляев А.А. Предпосылки к разработке способа промежуточной сепарации продуктов измельчения в дезинтеграторе // Совершенствование технологий и технических средст в АПК: Юбилейный сборник. – Барнаул: Изд-во АГАУ,2001. – с. 93-95.

75. Егоров Г.А. Технологические свойства зерна / Г.А. Егоров. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 218 с.

76. Шполянская, А.П. Исследование механических свойств зерна при статическом и ударном сжатии : дисс. канд. техн. наук. / А.П. Шполянская. М. : 1947.- 183 с.

77. Федоренко И.Я., Золоторев С.В., Смышляев А.А.. Особенности механического удара в измельчителях фуражного зерна // Вестник Алтайской науки. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та,2001. – Вып. 1. – Т.2. – с. 126-129.

78. Сергеев, Н.С. Теоретическое обоснование основных параметров процесса разрушения зерна в роторном измельчителе /Н.С. Сергеев, А.Г. Фиапшев // Сб. тр. Кабард.-Балк. ГСХА. Нальчик, 1995. - С. 103-107.

79. Федоренко И.Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна / И.Я. Федоренко, А.М. Левин // Механизация и электрификация.-2002.-№11. С. 32-33.

80. Дорофеев Н.С. Совершенствование технологических схем и параметров измельчителей фуражного зерна / Н.С. Дорофеев // Механизация подготовки кормов в животноводстве: Сб. науч. тр. — Воронеж, 1984. С. 25-33.

81. Иванов В.В. Геометрия дисковой пары ступенчатого измельчителя зерна. // Состояние и перспективы развития сельхозмашиностроения. Ростов-на-Дону. Материалы 7-й международной научно-практической конференции «Интерагромаш – 2014», с. 129-132.

82. Иванов В.В., Гуриненко Л.А., Семенихин А.М., Шкондин В.Н. Двухступенчатый измельчитель кормового зерна.- В сб.: Инновационные разработки для АПК.- Часть II.- Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2014.- С.-44-49.

83. Федоров, В.А. Разработка и обоснование основных параметров центробежного дискового измельчителя фуражного зерна : дисс. .канд.техн.наук. / В.А. Федоров. Челябинск, 2000. - 190 с.

84. Дозатор-распределитель зерна дискового измельчителя / В.В. Иванов [и др.] // Разработка инновационных технологий и технических средств для АПК. 2013. С.302-308.

85. Иванов В.В., Семенихин А.М., Гуриненко Л.А. высокотехнологичный измельчитель кормового зерна // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции. Минск, 23-24 октября 2014 г. В 2 ч. Ч. 1 / редкол.: Минск : БГАТУ, 2014. – 345-346 с.

86. Богомягких В.А. Теория и расчет бункеров для зерновых материалов / В.А. Богамягких, Ростов-на-Дону: Издательство РГУ, 1973 – 148 с.

87. Иванов В.В. Энергосберегающий ступенчатый измельчитель зерна/ Л.А. Гуриненко, В.В. Иванов, А.М. Семенихин // Состояние и перспективы развития сельхозмашиностроения. Ростов-на-Дону. Материалы 5-й международной научно-практической конференции «Интерагромаш – 2012», с. 61-64.

88. ГОСТ 13586.3-84 "Зерно. Правила приемки и методы отбора проб".

89. ГОСТ 13586.5-93 «Зерно. Методы определения влажности» .

90. Веденяпин Г.. Общая методика экспериментального исследования и обработки результатов опытных данных. М.: Колос,1967.

91. Василенко П.М. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований. М.:ВИМ, 1958.

92. РД 10.19.2 – 90 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и оборудование для приготовления кормов. Методы испытаний. – 80 с.

93. Василенко, П.М. Теория движения частиц по ■ шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П.М. Василенко — Киев: УСХА, 1960.- 175 с.

94. Глебов, Л.А. Гранулометрический состав измельченного зерна / Л.А. Глебов, Г. Газмаев // Комбикормовая промышленность. 1997. - №8. -С. 15-16

95. Денисов, В.А. Исследование процесса измельчения фуражного зерна в высокоскоростной центробежной дробилке и обоснование режимов ее работы : Дис. .канд. техн. наук / В.А. Денисов. М., 1979. - 215 с.

96. Сергеев, Н.С. Измельчитель фуражного зерна / Н.С. Сергеев // Уральские нивы. 1988. - № 11 - С. 42-43.

97. Пикуза, Н.Ф. Машины для приготовления комбинированных и концентрированных кормов (теория и расчеты) / Н.Ф. Пикуза. Ростов-на-Дону : Ин-т с.-х. машиностроения, 1973. - 165 с.

98. Сергеев, Н.С. Теоретическое обоснование основных параметров процесса разрушения зерна в роторном измельчителе /Н.С. Сергеев, А.Г. Фиапшев // Сб. тр. Кабард.-Балк. ГСХА. Нальчик, 1995. - С. 103-107.

99. Сергеев, Н.С. Определение максимальной производительности измельчителя фуражного зерна дисмембраторного типа / Н.С. Сергеев, А.Г. Фиапшев // Сб. тр. Кабард.-Балк. ГСХА. Нальчик, 1995. - С. 108-111.

100. Сергеев, Н.С. Измельчитель фуражного зерна / Н.С. Сергеев // Уральские нивы. 1988. - № 11 - С. 42-43.

101. Сергеев, Н.С. Новая конструкция и рабочий процесс центробежно-роторного измельчителя фуражного зерна / Н.С. Сергеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. - №6. - С. 30-31.

102. Сысуев, В.А. Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства Северо-Восточного региона Европейской части России на 2002.2010 гг. / В.А. Сысуев, В.И. Кряжков, В.И. Сыроватка и др. Киров, 2002. - 136 с.

103. Федоров, В.А. Разработка и обоснование основных параметров центробежного дискового измельчителя фуражного зерна : дисс. .канд.техн.наук. / В.А. Федоров. Челябинск, 2000. - 190 с.

104. Шагдыров, И.Б. Обоснование параметров многоступенчатой дробилки фуражного зерна : дисс. . канд. техн. наук. / И.Б. Шагдыров. Челябинск, 1988. -220 с.

105. Шполянская, А.П. Исследование механических свойств зерна при статическом и ударном сжатии : дисс. канд. техн. наук. / А.П. Шполянская. М. : 1947.- 183 с

106. Резник Е.Н. Кормоизмельчители для малых ферм / Е.Н. Резник // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1998. - №7. - С. 8-11.

107. Роже Гийо. Проблема измельчения материалов и ее развитие / Роже Гийо М.: Стройиздат, 1964. - 111 с.

108. Федоренко И.Я. Энергетические соотношения при ударном измельчении зерна / И.Я. Федоренко, А.М. Левин // Механизация и электрификация.-2002.-№11. С. 32-33.

109. Хорошенко Г. Современная концепция измельчения с использованием техники завтрашнего дня / Г. Хорошенко // Комбикорма. 2002. - №1. - С. 26-28.

110. Краснокутский Ю.В. Практикум по машинам и оборудованию для животноводческих комплексов / Ю.В. Краснокутский, С.В. Рыжов М.: Агропромиздат, 1987.-351 с.

111. Кретов И.Т. Технологическое оборудование предприятий пищекон-центратной промышленности / И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.М. Кравченко // Учебник. Воронеж: Изд. Воронежского университета, 1996. - 448 с.

112. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов. / Г.М: Кукта М.: Агропромиздат, 1987. - 303 с.

113. Кукта Г.М. Технология переработки и приготовления кормов / Г.М. Кукта // Кормопроизводство. 1992. - №3. - С. 6-7.

114. Дорофеев Н.С. Совершенствование технологических схем и параметров измельчителей фуражного зерна / Н.С. Дорофеев // Механизация подготовки кормов в животноводстве: Сб. науч. тр. — Воронеж, 1984. С. 25-33.

115. Дробилка зерна Д3-30*45 Электронный ресурс. Электронный пр.т. Режим доступа: http://www.apso.ru/catalog1020?ps=11435 .

116. Дробилки зерновые Электронный ресурс. Электронный пр.т. Режим доступа: http://www.remz.uu.ru/drobilki.htm .

117. Перекопский А.Н., Баранов Л.Н. Технологические решения производства плющенного фуражного зерна в Ленинградской области /Актуальныепроблемы инженерного обеспечения АПК. Часть III. Сб. науч. тр. Ярославль: ЯГСХА, 2004, - С.

118. Иванов В.В., Семенихин А.М., Гуриненко Л.А. высокотехнологичный измельчитель кормового зерна // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Международной научно-практической конференции. Минск, 23-24 октября 2014 г. В 2 ч. Ч. 1 / редкол.: Минск : БГАТУ, 2014. – 345-346 с.

119. Ромалийский В.И. Исследование процесса плющения и обоснование параметров плющилки и режимов обработки консервированного зерна. Ав-тореф. . канд. техн. наук. -М., 1978.

120. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники М.: Минсельхозпром России, 1998. -220 с.

121. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники, ч. II. Нормативно-справочный материал. М.: Минсельхозпром России, 1998. - 252 с.

122. Методика экономической оценки технологий и машин в сельском хозяйстве. Под ред. Драгайцева В.И. Всероссийский наукчно-исследовательский институт экономики сельского хозяйства. - Москва, 2010. – 146с.

123. Нормы и нормативы в животноводстве: научно-методическое пособие / В.В. Кузнецов, А.И. Баранников, В.Я. Кавардаков и др. – Ростов-на-Дону, 2008. – 400с.

124. Ковалев В.В. Методы оценки инвестиционных проектов / В.В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 144с.

125. Stockman K. Technologie der Mischfutter Herstellung / K. Stockman. - Hannover, 1960. 210 c.

126. Van Aarsen. Передовая технология для комбикормовой индустрии / Van Aarsen // Комбикорма. 1999. - №7. - С. 25-27.

127. Baouman. Application des lois generales du broyage. L'industrie Chimique, 1955.166. Bond F.C. Some recent advances in grinding theory and practice // Brit. Fnang., 1963. 8 N 9 P.84 93.

128. Rilley R.V. Theory and practice end grinding //Chemical and process engineering, 1965. Vol.46, N 4. - P. 189 - 195.

129. Rumpf H. Prinzipen der Prallzerkleinerung und ihre Anwendung bei der Strahlmahlung. Chemie - Ingenieuer - Technic. 1960, Bd. 32, N 3, S. 129 - 252.

130. Schellinger K., Lalkela R. D.A. calorimetric method for studyiding grinding in a tumbling medium. Approximation of efficiencies of commercial mill by the energy balance method. Min. Eng. Jorn. Vol. N4, 1952.

131. Schwartzberg H. G. And Treybal R. E. Fluid and Partical Motio

n Turbulent Stirred Tanks. Fluid Motion. Industrial and Chem., V 7, N 1, Febr. 1968, P. 1-6.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Условные обозначения

ε – относительная деформация;

σ – нормальное напряжение;

Н – мгновенный модуль упругости;

Е – длительный модуль упругости;

n – время релаксации напряжений;

ω – относительная скорость деформации;

***kд* –** коэффициент динамичности;

ψ – относительная деформация;

δ – рабочий зазор;

Δ – абсолютная деформация зерен;

λ – степень измельчения;

Fб – площадь бороздок подающего пояса;

Fр – площадь площадок релаксации;

Fм – площадь модульного пояса;

ω0 – частота вращения диска

ψб; ψр; ψм – коэффициенты заполнения бороздок, релаксаторов и модульного пояса;

f – коэффициент трения продукта о поверхности диска.

К – кинематическая вязкость;

Δ1 – зазор дозатора-распределителя;

М – модуль помола;

Q – производительность (подача);

Rп, Rпд, Rм – радиусы поясов дисков;

α – угол наклона бороздок.

Приложение 2

Методика инженерного расчета параметров дискового измельчителя кормового зерна

1. По удельной производительности для среднего помола и требуемой производительности макета Q=500 кг/ч определяем площадь рабочей поверхности дисковой пары $F_{раб}$.

$$F_{раб} = \frac{Q}{q_{уд}} = \frac{500}{11460} = 0{,}044 \text{ м}^2$$

2. Машинальную величину наружного радиуса цилиндра цилиндра дозатора-распределителя принимаем с учетом диаметра вала, ступицы диска, зазоров между ступицей и внутренним диаметром, толщены стенки цилиндра и распределительного кольца между наружной поверхностью и приемным окном приемного пояса.

Пропускную способность приемного окна проверяем по соотношению

$$Q<Q_p.$$

$$Q_{\max} = 2\pi \cdot R_0 \cdot d_э \cdot V_п \cdot \rho \cdot \Psi = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}06 \cdot 0{,}003 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}5 \cdot 3600 = 712 \text{ кг/ч}$$

500 кг/ч < 712 кг/ч

3. По заданной производительности, полученной величине рабочей поверхности и радиусу приемного пояса модели R_0 = 60 мм определяем величину наружного радиуса дисков по соотношению

$$F_{раб} = \pi(R_н^2 - R_п^2)$$

откуда

$$R_н = \sqrt{\frac{F_{раб} + \pi R_п^2}{\pi}}$$

После подстановки составляющих, имеем

$$R_н = \sqrt{\frac{0{,}044 + 3{,}14 \cdot 0{,}0036}{3{,}14}} = 0{,}132 \text{ м.}$$

Округляем величину $R_н$ до стандартного размера $R_н$=135 мм. Диаметр дисков без фасок 270 мм.

Приложение 2

4. Задавшись значением коэффициента измельчения (перехода) от подающему к модульному поясам λ=2, определяем величину радиуса модульного пояса по зависимости

$$R_м\sqrt{\frac{R_н^2+\lambda R_0^2}{1+\lambda}}=\sqrt{\frac{0{,}0176+2\cdot 0{,}0036}{3}}=0{,}091\text{ м}$$

Принимаем ближайший стандартный размер $R_м$=95 мм.

5. Зная величину $R_м$ рассчитываем площади подающих бороздок и площадок релаксации (удержание деформации) $F_A^б$ и $F_B^к$ по зависимостям

$$F_A^б=\frac{\pi\left(R_M^2-R_0^2\right)}{\left(\lambda+1\right)}=\frac{3{,}14(0{,}00827-0{,}0036)}{3}=0{,}0049\text{ м}^2$$

и

$$F_B^к=\frac{\pi\left(R_M^2-R_0^2\right)\lambda}{\left(\lambda+1\right)}=\frac{3{,}14(0{,}00827-0{,}0036)}{3}\cdot 2=0{,}0098\text{ м}^2$$

6. Зная радиусы поясов дисков, определяем площадь модульного пояса по зависимости

$$F_м=F_C=\pi(R_н^2-R_м^2)=3{,}14(0{,}0176-0{,}00827)=0{,}0293\text{ м}^2$$

Проверяем, уточняем, результаты расчетов радиусов и площадей по результатам первого шага методики

$$F_A^б+F_B^к+F_м=F_{мр}$$

После подстановке имеем

$$0{,}0049+0{,}0098+0{,}0293=0{,}044\text{ м}^2$$

С учетом форм эпюр напряжений на элементах рабочей поверхности дисков, определяем силы сжатия потоков продукта измельчения по зависимостям:

для бороздок

$$P_б=\sigma_п\frac{F_A}{2}\psi_б=111\frac{49}{2}\cdot 0{,}2=543{,}9\text{ Н}$$

для классификаторов

Приложение 2

$$P_к = \sigma_к \frac{F_в}{2} \psi_к = 111 \frac{98}{2} \cdot 0{,}15 = 815{,}85 \text{ Н}$$

для модульного пояса

$$P_м = \sigma_м \frac{F_м}{2} \psi_м = 111 \frac{293}{2} \cdot 0{,}1 = 1626{,}16 \text{ Н}$$

8. По зависимости (2.46) определяем мощность, необходимую для выполнения процесса измельчения – деформации и классификации частиц

$$N_{пр} = \left(P_б \cdot f_б \cdot R_{срб} + P_к \cdot f_к \cdot R_{срк} + P_м \cdot f_м \cdot R_{срм}\right)\omega_0 =$$

$$\left(543{,}9 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}075 + 815 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}075 + 1626{,}16 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}113\right)60 = 857{,}15 \text{ Вт}$$

При подстановке данных в расчетную формулу мощности сделано допущение о равнозначности коэффициентов перекатывания для всех рабочих поверхностей диска $f_б = f_к = f_п = 0{,}05$.

Таким образом расчетные параметры лабораторной модели измельчителя для режима среднего помола пшеницы составили:

R_0=60 мм; $d_э$=3 мм; $V_п$=250 м/с; ρ=1400 кг/м^3; Ψ=0,5; $F_{раб}$=0,0044 м^2; $N_{пр}$=0,857 кВт; Q=500 кг/ч; $q_{уд}$=1,715 кВт·ч/т.

Приложение 3

Таблица П. 4.1 Результаты расчетов параметров модельного ряда дисковых измельчителей зерна

№ п/п	$F_р$, м^2	Радиусы поясов			Площади элементов поверхности, дм^2				Подача, т/ч			Мощность кВт
		$R_п$	$R_м$	$R_н$	$F_м$	$F_п$	$F_б$	$F_к$	0,2-1,0	1,0-1,8	1,8-2,6	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,1	0,06	0,119	0,188	6,65	3,32	1,11	2,21	0,492	1,146	1,800	1,471
2	0,2	0,065	0,158	0,260	13,34	6,65	2,22	4,43	0,984	2,292	3,600	2,942
3	0,3	0,070	0,191	0,317	20,00	9,98	3,33	6,65	1,476	3,438	5,400	4,413
4	0,4	0,075	0,219	0,364	26,69	13,31	4,44	8,87	1,968	4,584	7,200	5,884
5	0,5	0,080	0,243	0,406	33,34	16,64	5,55	10,09	2,460	5,730	9,000	7,355
6	0,6	0,110	0,343	0,574	66,66	33,31	11,10	22,21	4,900	11,460	18,000	53,820

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2511291

ДИСКОВЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ КОРМОВОГО ЗЕРНА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия" (ФГБОУ ВПО АЧГАА) (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2012142839**

Приоритет изобретения **08 октября 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***06 февраля 2014 г.***

Срок действия патента истекает **08 октября 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 511 291** (13) **C1**

(51) МПК
B02C 9/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012142839/13, 08.10.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
08.10.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **08.10.2012**

(45) Опубликовано: **10.04.2014** Бюл. № **10**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2127034C1, 10.03.1999. RU 2070836C1, 27.12.1996. RU2252073C1, 20.05.2005. RU2380158C1, 27.01.2010**

Адрес для переписки:
347740, Ростовская обл., г. Зерноград, ул. Ленина, 21, ФГБОУ ВПО АЧГАА

(72) Автор(ы):
Иванов Вячеслав Владимирович (RU),
Шварц Сергей Александрович (RU),
Семенихин Александр Михайлович (RU),
Гуриненко Людмила Александровна (RU),
Ященко Василий Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Азово-Черноморская государственная агроинженерная академия" (ФГБОУ ВПО АЧГАА) (RU)

(54) ДИСКОВЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ КОРМОВОГО ЗЕРНА

(57) Реферат:

Изобретение может быть использовано в кормоприготовительных цехах животноводческих и птицеводческих комплексов. Задачей данного изобретения является снижение энергоемкости процесса и получение различных модулей помола зерновок. Поставленная задача решается тем, что дисковый измельчитель кормового зерна, содержащий основание-корпус с приемной воронкой, внутри которого соосно расположены обращенные друг к другу рабочими поверхностями пара дисков, один из которых неподвижно установлен на основании-корпусе, а другой, подвижный, закреплен на вертикальном валу, в центре неподвижного диска выполнено сквозное отверстие, сообщенное с приемной воронкой, снабжен узлом регулировки рабочего зазора между дисками, на вертикальном валу параллельно расположены две пары дисков, причем ниже первой пары дисков находится конусообразная решетка сепаратора, вершина которой обращена вниз к скатной доске, под которой установлена вторая пара дисков. Неподвижный и подвижный диски выполнены с тремя поясами деформации: приемного пояса, имеющего подающие бороздки треугольного сечения, обращенные углублениями в сторону возможного вращения подвижного диска, подводящего пояса с площадками концентрично-радиального сечения и модульного пояса, соответствующего заданному гранулометрическому составу, который расположен на одной третьей периферийной части диска. 2 ил.

RU 2511291 C1

RU 2511291 C1

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

XVII Агропромышленный форум юга России

ИНТЕРАГРОМАШ

АГРОТЕХНОЛОГИИ

Конкурс «Прогрессивные виды сельскохозяйственной техники и оборудования для АПК»

ДИПЛОМ
II СТЕПЕНИ

к серебряной медали

В номинации «Машины и оборудование для кормозаготовки и кормоприготовления»

«Азово-Черноморская инженерная академия» ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет» (г. Зерноград)

За создание и внедрение в сельскохозяйственное производство дискового измельчителя кормового зерна

Председатель конкурсной комиссии Кольчик Анатолий Федорович

25-28 ФЕВРАЛЯ 2014

КОМИТЕТ ПО МОЛОДЕЖНОЙ ПОЛИТИКЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ
www.kmpro.ru

АРМИ

МОЛОДЕЖНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ КОНВЕНТ - 2014 РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

ДИПЛОМ

II

место

НАГРАЖДАЕТСЯ:

Иванов Вячеслав Владимирович

Азово-Черноморский Инженерный Институт ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде

ЗА ПОБЕДУ В МОЛОДЕЖНОМ ИННОВАЦИОННОМ КОНВЕНТЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В НОМИНАЦИИ «ЛУЧШИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ»

Первый заместитель Губернатора Ростовской области

И.А. Гуськов

Ростов-на-Дону
2014 г.

МОЛОДЕЖНЫЙ
ИННОВАЦИОННЫЙ
КОНВЕНТ - 2014
РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ
КОМИТЕТ ПО МОЛОДЕЖНОЙ ПОЛИТИКЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ
АРМИ
СЕРТИФИКАТ
участника
Молодежного инновационного конвента
Ростовской области
Иванова
Вячеслава Владиславовича
Председатель комитета
по молодежной политике
Ростовской области
В.Н. БАБИН
Ростов-на-Дону
31 октября 2014 года