

На правах рукописи



Искендеров Рамиль Рашидович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РОТОРНОЙ
ДРОБИЛКЕ**

Специальность 05.20.01 - Технологии и средства механизации сельского
хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ставрополь - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лебедев Анатолий Тимофеевич.

**Официальные
оппоненты:**

Фролов Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», заведующий кафедрой «Механизация животноводства и безопасность жизнедеятельности»;

Коношин Иван Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», декан факультета агротехники и энергообеспечения.

Ведущая организация: ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»
(г. Зерноград Ростовской области).

Защита состоится 3 июля 2017 г. в 11-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.021.02, созданного на базе ФГБОУ ВО Донского государственного аграрного университета и ФГБОУ ВО Ставропольского государственного аграрного университета, по адресу: 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» <http://www.dongau.ru/>.

Автореферат разослан _____ 2017 г. и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» <http://www.dongau.ru/>.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шабанов Николай Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стратегическим направлением развития агропромышленного комплекса страны является стабильное производство продукции животноводства, в структуре себестоимости которой на долю кормов приходится более 60% общих затрат. Одной из основных операций подготовки кормов к скармливанию является измельчение зерновых материалов. На его осуществление приходится до 75% энергетических и 45% трудовых затрат. Отсутствие целых и недоизмельченных частиц, низкое содержание пылевидных фракций и выровненный гранулометрический состав измельченного зернового материала не только обеспечивают повышение продуктивности животных, но и являются критериями оценки эффективности работы измельчающих устройств.

В настоящее время в линиях приготовления кормов широко используются молотковые и ударно-центробежные дробилки, которые обеспечивают заданный модуль помола зернофуража в зависимости от возрастной категории животных и птиц. При их работе содержание пылевидной фракции увеличивается до 30% при тонком помоле, а недоизмельченной до 20% при грубом, что снижает качество готового продукта и повышает удельную энергоемкость процесса измельчения.

Таким образом, повышение эффективности процесса измельчения зерновых материалов за счет совершенствования технических средств его реализации и методов оценки качества измельчения готового продукта, представляет практический интерес, а тема научного исследования является актуальной.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ», раздел 1.4.42 «Разработать методики и программы проектирования и оптимизации производственных процессов в АПК с целью повышения ресурсосбережения и эффективности производства сельскохозяйственной продукции».

Степень разработанности темы. Исследованиями характеристик измельчаемого продукта занимались П.Р. Риттингер, Г. Румпф, П.А. Ребиндер и другие. Вопросам измельчения зерновых материалов и приготовления комбикормов посвятили свои труды В.П. Горячкин, В.А. Елисеев, В.И. Сыроватка, С.В. Мельников, Н.С. Сергеев, И.Н. Краснов, А.М. Семенихин, А.И. Завражнов, В.И. Пахомов, В.Ю. Фролов, А.Т. Лебедев, И.В. Коношин и другие ученые.

Несмотря на применение различных машин и большое количество исследований процесса измельчения они не в полной мере обеспечивают выполнение зоотехнических требований и недостаточно точно отражают выравненность гранулометрического состава измельченных зерновых материалов.

Объект исследования - процесс измельчения зерновых материалов в горизонтальной роторной дробилке.

Предмет исследования - закономерности процесса измельчения зерновых материалов в горизонтальной роторной дробилке.

Цель исследования - повышение эффективности процесса измельчения зерновых материалов в горизонтальной роторной дробилке с обоснованием её конструктивных параметров и режимов работы.

Задачи исследований:

- на основе исследований, выявить основные направления совершенствования процесса измельчения кормового зерна, обосновать конструктивно-технологическую схему горизонтальной роторной дробилки;
- теоретически исследовать процесс измельчения зерновых материалов в горизонтальной роторной дробилке;
- разработать методику оценки эффективности процесса измельчения;
- экспериментально исследовать влияние конструктивно-режимных параметров дробилки и физико-механических свойств материала на качественные и энергетические показатели, определить их рациональные значения;
- провести производственные испытания горизонтальной роторной дробилки и оценить её технико-экономическую эффективность.

Научную новизну представляют:

- конструктивно-технологическая схема горизонтальной роторной дробилки, позволяющая получать измельченный продукт, выровненный по гранулометрическому составу. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ № 2545653, № 2546228, № 2552958 и № 155477.
- аналитические зависимости процесса измельчения, характеризующие закономерности взаимодействия зерновых материалов с рабочими органами горизонтальной роторной дробилки;
- методика оценки выравненности гранулометрического состава измельченных зерновых материалов и затрат на получение соответствующего зоотехническим требованиям продукта показателем фактической результативности этого процесса;
- рациональные конструктивные параметры и режимы работы горизонтальной роторной дробилки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны конструктивно-технологическая схема горизонтальной роторной зернодробилки, аналитические зависимости процесса измельчения в ней, методика оценки качества готового продукта показателем фактической результативности и установлено влияние конструктивно-режимных параметров этой дробилки на выравненность гранулометрического состава измельченного в ней материала.

Разработанная дробилка выдает измельченную зерновую массу, которая до 98% однородна по гранулометрическому составу и практически исключает пылевидные фракции. Фактическая результативность измельчения в ней $\Phi_{\text{ри}} = 24...49$. Новые технические решения позволили в 1,5...3 раза снизить удельные энерго- и металлоемкость по сравнению с малогабаритными зернодробилками, представленными на рынке измельчающей техники.

Методология и методы исследований. Проведенные исследования основаны на анализе отечественной и зарубежной научно-технической литературы. Теоретические и экспериментальные исследования выполнялись с использованием законов математики, физики и теоретической механики в лабораторных и производственных условиях. Использовались общепринятые и частные методики, подходы планирования многофакторных экспериментов,

оборудование в соответствии с действующими ГОСТами и методы математической статистики, программ Microsoft Excel 2007, ZetLab и JMicrovision.

На защиту выносятся следующие положения:

- конструктивная схема горизонтальной роторной дробилки;
- методика оценки эффективности процесса измельчения по показателю его фактической результативности;
- рациональные конструктивные параметры и режимы работы горизонтальной роторной дробилки;
- математические зависимости производительности, энергоемкости и качественной составляющей процесса разделения зерновых материалов на части;
- технико-экономические показатели использования горизонтальной роторной дробилки для измельчения зернофуража в производственных условиях.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты работы докладывались и получили положительную оценку на научно-практических конференциях ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ» (2014 - 2016 гг.), на международных агропромышленных выставках «НТТМ-2015» (Москва, апрель, 2015 г.), «Машук-2015» (Пятигорск, август, 2015 г.), «Агроуниверсал» (Ставрополь, 2013 - 2016 гг.). Соискатель, представив результаты данной работы, стал победителем конкурсов «УМНИК-РФ» (Ставрополь, апрель, 2015 г.), Минсельхоза РФ на лучшую научную работу в номинации «технические науки» (Нальчик, Ставрополь, май, 2015 г.), Минсельхоза СК «Премия-2020» в области науки, инноваций и инициатив (Ставрополь, ноябрь, 2016 г.).

Результаты исследований одобрены и внедрены Минсельхозом Ставропольского края в рамках государственного контракта № 242/16 «Разработка технической документации на оборудование для измельчения и смешивания зернофуражных ингредиентов в процессе приготовления кормовых смесей крестьянскими (фермерскими) хозяйствами». Предлагаемые технические решения внедрены в линию по приготовлению кормов КФХ «Алена» с. Благодатное, Петровского района, Ставропольского края по патенту № 2545653 и используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, 4 патента РФ. Общий объем публикаций 5,43 печ. л., из которых 2,36 печ. л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и 13 приложений. Она изложена на 155 страницах основного машинописного текста и содержит 46 рисунков, 15 таблиц, библиографический список из 123 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель работы, объект исследования, предмет исследования, методика исследований, научная новизна, практическая значимость, реализация результатов, положения, выносимые на защиту, апробация работы.

В первой главе диссертации «Состояние вопроса измельчения зерновых материалов. Цель и задачи исследования» рассмотрены назначение и место технологического процесса в сельском хозяйстве, представлен анализ способов измельчения материалов и разновидностей машин, используемых для разделения их на части, выполнен анализ основных направлений по повышению эффективности процесса измельчения зерновых материалов.

Анализ способов воздействия показал, что при разделении исходных продуктов на части определяющими являются их физико-механические свойства и параметры рабочих поверхностей измельчителя.

Аналитическим обзором конструкций измельчающих машин установлено что, несмотря на универсальность и простоту конструкции, получившие наибольшее распространение молотковые дробилки требовательны к влажности зернового материала (не более 17%), выдают до 20 % целых частиц исходного продукта и до 30% пылевидных фракций. Эксплуатационной экономичности и эффективности процесса измельчения зерновых материалов для приготовления концентрированных кормов наиболее полно отвечают дробилки, использующие скалывающее воздействие для разделения материала на части при минимальном по общей длительности процессе (от загрузки до вывода). Среди таких дробилок можно выделить вальцовые и центробежно-роторные измельчители, которые являются энерго- и металлоемкими для использования в малых фермерских и личных подсобных хозяйствах, но при этом выдают достаточно выровненный по однородности состав измельченного продукта.

По результатам проведенного анализа сформулирована **научная гипотеза**: повысить эффективность процесса измельчения зерновых материалов, за счет создания энергоэффективной конструктивно-технологической схемы разделения исходных зерновых материалов на части срезом и скалыванием с получением однородного фракционного состава готового продукта, возможно в конструкции горизонтальной роторной дробилки.

Во второй главе «Теоретические предпосылки повышения эффективности процесса измельчения зерновых материалов» предложена конструкция горизонтальной роторной дробилки использующей для разделения зерновых материалов на части способ скалывания. Описаны и обоснованы условия достижения максимальной эффективности процесса измельчения.

В соответствии с предложенной А.Т. Лебедевым методикой, горизонтальная роторная дробилка (патент РФ № 2546228) представлена самостоятельной сложной технической системой, низшими элементами которой являются рабочие поверхности (рифли) статора и ротора, контактирующие с материалом и непосредственно участвующие в выполнении технологического процесса, - измельчение зерновых материалов, который относится к одному из наиболее распространенных на практике *ключевому* процессу - «разделение материалов на части». Поэтому целевым назначением рифлей является создание условий разделения исходных зерновок на заданное количество частиц до достижения ими, в соответствии с зоотехническими требованиями, необходимого размера. В результате реализована энергоэффективная схема разрушения зерновых

материалов: заклинивание - воздействие - вывод. Кроме того имеется возможность управления интенсивностью сжимающих и истирающих воздействий для получения однородного состава измельченного материала.

Контакт ротора с исходным зерновым продуктом происходит по углу $\gamma_{в.р}$, который определяет не только длительность разделения зерновок до требуемого размера, но и время образования пылевидных фракций. При загрузке зерна организована подача материала в зону среза. При этом взаимное расположение рифлей ротора и статора соответствует схеме - «острие по острию», а за счет выполнения уклона β и упора γ достигается улучшенный захват материала в зоне скалывания по углу α (рисунок 1 а). Новизна конструктивной схемы роторной дробилки, подтверждена патентами РФ № 2545653, № 2552958, № 155477.

Процесс измельчения в дробилке (патент № 2545653) происходит следующим образом. Поступая из бункера в загрузочное окно 1, зерновки наполняют приемную (дробильную) камеру 2, попадают в продольные пазы (между рифлями) ротора и транспортируются к противорезам (рифлям) статора 3, где и происходит изменение их исходной формы (скалывание) 4. Затем материал дополнительно калибруется и перемещается к разгрузочному окну 5.

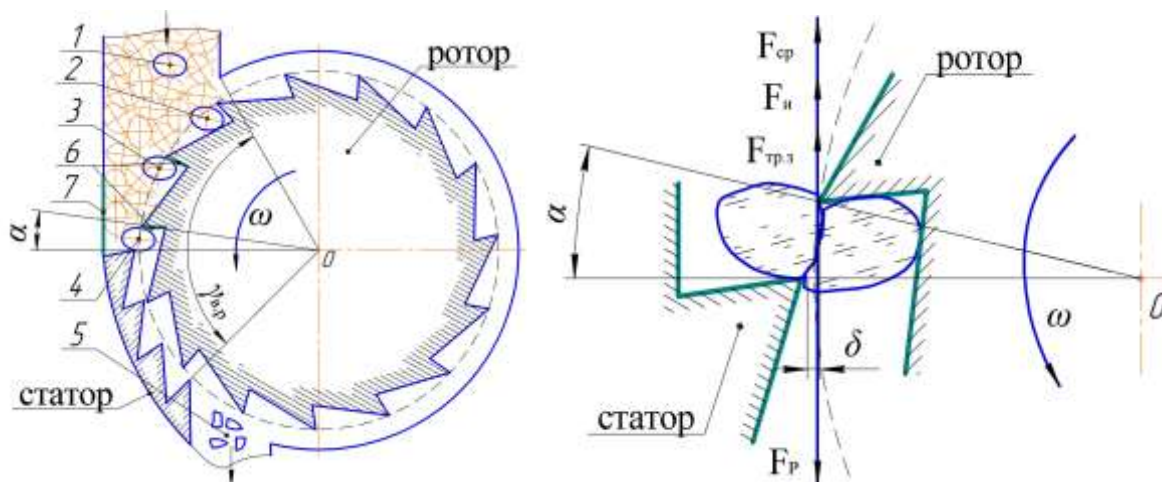


Рисунок 1 - Принципиальная схема горизонтальной роторной дробилки (а) и схема разделения зерновки на части (б)

В момент разделения (рисунок 1 б) зерновка массой m_z заклинивается и начинает разрушаться усилием среза $F_{ср}$, при достижении в ней критического напряжения τ . Затем часть зерновки, находящаяся в пазу начинает перемещаться и дополнительно появляются сила инерции $F_{и}$ и сила трения $F_{тр.з}$ массы зерновки $m_{ч.з}$, то есть скол частицы материала характеризуется результирующей сил F_p .

$$F_p = F_{ср} + F_{и} + F_{тр} \quad (1)$$

Разрушающее усилие зерновки $F_{ср}$ по площади среза $A_{ср}$ определится как:

$$F_{ср} = \tau \cdot A_{ср}, \quad (2)$$

Сила инерции $F_{и}$ части зерновки массой $m_{ч.з}$ при ускорении a равна:

$$F_{и} = m_{ч.з} \cdot a \quad (3)$$

Сила трения $F_{тр.з}$ срезаемой зерновки об оставшуюся на противорезе ее часть создается центробежной силой этой массы $m_{ч.з}$:

$$F_{тр.з} = m_{ч.з} \cdot \omega^2 \cdot R \cdot k_{тр.з}, \quad (4)$$

где $k_{тр.з}$ - коэффициент внутреннего трения зерновки; ω - угловая скорость ротора, рад/с; R - радиус ротора горизонтальной дробилки, м.

С учетом эквивалентного диаметра зерновки $D_з$ и формул (2), (3) и (4) выражение (1) равнодействующей сил F_p примет вид:

$$F_p = \tau \cdot \frac{\pi D_з^2}{4} + \frac{m_{ч.з} v_p^2}{D_з} + m_{ч.з} \cdot \omega^2 \cdot R \cdot k_{тр.з}, \quad (5)$$

где v_p - окружная (линейная) скорость ротора, м/с.

Расчет составляющих $F_{ср}$, $F_{ин}$, $F_{тр.з}$ равнодействующей сил F_p показал, что силы трения и инерции очень малы (менее 1% от F_p) по сравнению с силой $F_{ср}$. Значение разрушающего усилия $F_{ср}$ будет определять энергетическую составляющую скалывания (среза) и изменяться исходя из рабочего зазора между кромками рифлей δ , и динамической составляющей процесса измельчения.

Теоретически рассчитан диаметр ротора горизонтальной дробилки не менее $D_{\min} = 0,62$ м. В экспериментальных исследованиях принят $D = 0,1$ м и обоснованы шаг t , высота h и количество $n_{п}$ рифлей: пшеница $t = 8$ мм, $h = 1,2$ мм, $n_{п} = 38$ шт.; ячмень $t = 10$ мм, $h = 1,5$ мм, $n_{п} = 32$ шт.; овёс $t = 13$ мм, $h = 1,4$ мм, $n_{п} = 34$ шт.; кукуруза $t = 15,5$ мм, $h = 2,4$ мм, $n_{п} = 20$ шт. Универсальная нарезка рифлей для одновременного измельчения четырех культур $t = 11,5$ мм, $h = 1,6$ мм, $n_{п} = 28$ шт. Углы заострения рифлей выполняют в пределах $20...110^\circ$, в разработанной дробилке приняты угол острия $\beta = 60^\circ$ и угол наклона стенки паза $\beta_1 = 15^\circ$.

Теоретическая производительность дробилки Q (кг/с) определена как объем продукта ΔV , выводимый через зону разрушения в единицу времени:

$$Q = l \cdot (h + \delta) \cdot v_p \cdot \rho \cdot n_n \cdot k_з, \quad (6)$$

где l - длина ротора, м; h - высота рифли (паза) ротора, м; ρ - насыпная плотность зернового материала, кг/м³; n_n - количество пазов на роторе; $k_з$ - коэффициент заполнения приемной камеры;

Или с учетом необходимой степени измельчения λ :

$$Q = l \cdot \frac{D}{\lambda} \cdot v_p \cdot \rho \cdot n_n \cdot k_з, \quad (7)$$

где D - исходный размер частицы, например $D_з$, м; λ - степень измельчения для крупки соответствующей зоотехническим требованиям.

Отношение текущего давления слоя материала и давления воздушных потоков в рабочей полости дробилки, создаваемых вращающимся ротором, будет влиять на коэффициент заполнения $k_з$ рабочей полости зерновым материалом, и характеризоваться критической окружной скоростью ротора.

Мощность P (Вт) для измельчения зерновых материалов характеризуется усилием, затрачиваемым на одномоментное разрушение зерна расположенного между рифлями ротора и статора горизонтальной дробилки:

$$P = F_p \cdot n_з \cdot v_p \cdot k_d \quad (8)$$

где F_p - разрушающее усилие зерновки материала, Н; $n_з$ - количество зерновок в одном пазу ротора, шт.; k_d - динамический коэффициент.

Функция наимыгоднейшего решения для повышения эффективности процесса измельчения $\mathcal{E}_и$ в горизонтальной роторной зернодробилке, - лучшие качество и производительность, при меньшей удельной энерго- и металлоемкости:

$$\mathcal{E}_и = f(Q, N_{уд}, M_{уд}, K), \quad (9)$$

где $N_{уд}$, $M_{уд}$ - удельная энерго- и металлоемкость; K - показатель качества готового измельченного продукта.

По действующей методике оценки качества K , если готовый продукт соответствует заданному модулю помола M , то вся его масса $M_{об}$ считается пригодной для дальнейшего использования. Так как, процесс измельчения имеет вероятностный характер предлагается разделить объем измельчения $M_{об}$ на три фракции: соответствующая требованиям $M_{тр}$, недомолот M_n и перемолот M_p :

$$M_{об} = M_n + M_{тр} + M_p. \quad (10)$$

Тогда оценку качества K можно производить по методике, предложенной А.Т Лебедевым, по показателю фактической результативности. Фактическую результативность процесса измельчения $\Phi_{ри}$ определится:

$$\Phi_{ри} = \frac{M_{тр}}{M_n + M_p}, \quad (11)$$

Анализ помольной характеристики молотковой дробилки «Зубрёнок» при измельчении кормового зерна птице ($M = 1,8 \dots 2,6$), показал, что модуль помола составил $M = 2,1$ мм ($\lambda = 2,2$), а $\Phi_{ри} = 2,6$. Фактически это означает, что количество некондиционных фракций ($M_p + M_n$) составляет 27,9% от общей массы готового продукта $M_{об}$, но при этом сам помол соответствует зоотехническим требованиям. Тогда для обеспечения минимального показателя качества K , когда некондиционные фракции не превышают 19% и полученная крупка не нарушает требований ГОСТ Р 54379-2011, и соответствует M , фактическая результативность процесса измельчения зерновых материалов должна быть не менее $\Phi_{ри} = 4,26$.

Сравнительная оценка эффективности измельчения в различных линиях приготовления концентрированных кормов проведена с использованием показателя $\Phi_{ри}$. При этом все отклонения от заданной крупности, предполагаем учитывать затратами на дополнительные операции (повторное измельчение, сортировка, гранулирование и др.). Тогда уравнение общих затрат для получения корма $M_{ф.тр}$ заданного качества, можно представить в следующем виде:

$$Z_{общ}^{M_{ф.тр}} = Z_{от}^{M_{об}} + Z_{э}^{M_{об}} + Z^{M_p} + Z_{от}^{M_n} + Z_{э}^{M_n} + Z_{от}^{M_d} + Z_{э}^{M_d}, \quad (12)$$

где $Z_{от}^{M_{об}}$, $Z_{от}^{M_n}$, $Z_{от}^{M_d}$, $Z_{э}^{M_{об}}$, $Z_{э}^{M_n}$, $Z_{э}^{M_d}$ - оплата труда и электроэнергии при измельчении исходной массы $M_{об}$ зерна, недомолота M_n , и дополнительной массы M_d равной массе перемолота M_p ; Z^{M_p} - переработка перемолота, руб.

В данной модели, затраты на переработку перемолота для упрощения расчетов приняты равными стоимости реализации зернового материала, но с учетом питательной ценности пылевидной фракции. Произведя некоторые преобразования и используя показатель фактической результативности процесса измельчения $\Phi_{ри}$, а также при $M_d = M_p$, выражение (12) примет вид:

$$Z_{общ} = (C + C_3 \cdot \frac{N}{Q}) \cdot [M_{тр} \cdot (\frac{2}{\Phi_{ри}} + 1)] + M_p \cdot C_3 \cdot k_p, \quad (13)$$

C - тарифная ставка рабочего, руб./ч; M_i - масса $M_{об}$, M_n , M_d , кг; C_3 - стоимость электроэнергии, руб./кВтч; N - потребляемая электроэнергия, кВтч; C_3 - стоимость зернофуража, руб./кг; k_p - коэффициент питательности перемолота; $(M_p \cdot C_3 \cdot k_p)$ - повторная переработка (может проводиться неоднократно), руб.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований процесса измельчения зерновых материалов» разработана программа исследований, описаны оборудование и методики проведения экспериментов.

Размерные параметры зерновок получали штангенциркулем ШЦЦ-I ГОСТ 24156-02 класса точности 2. Весовые параметры исходного и навесок измельченного зернового материала определяли на электронных лабораторных весах Госметр ВТ-600. Высушивание образцов проводилось в сушильном шкафу ШС-80-01, а влажность фиксировали на анализаторе ЭЛВИЗ 2.

Для определения разрушающего усилия зерновок на срез была изготовлена установка (рисунок 2 а), состоящая из электропривода 1, элемента среза 2, установленного на тензозвено, и рамы 3. Схема сдвига зерновок пшеницы 1 и кукурузы 2 в каналах срезающего элемента изображены на рисунке 2 д.

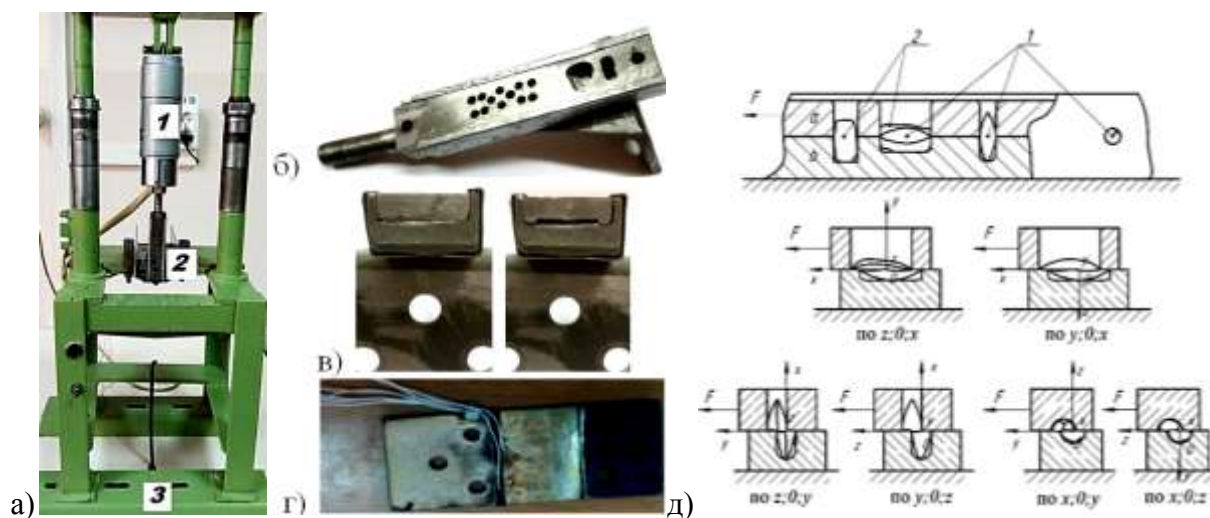


Рисунок 2 - Установка (а), срезающий элемент (б), зазор между режущими поверхностями (в), тензозвено (г) и схема сдвига зерновок пшеницы (д)

Напряжение τ на срез зерновок определяли сопоставлением передаваемого через АЦП от тензодатчика разрушающего усилия F_p в программе ZetLab, и поверхности среза зерновки, которую анализировали в программе JMicrovision.

В мастерских ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ» создан опытный образец горизонтальной роторной дробилки. Конструкция экспериментальной машины (рисунок 3) позволяет: применять индивидуальные рабочие поверхности для каждой измельчаемой культуры; варьировать рабочий зазор и длину ротора; наблюдать за дроблением и движением зернового материала в рабочей камере через выполненную из оргстекла прозрачную стенку корпуса; регулировать частоту вращения ротора во время

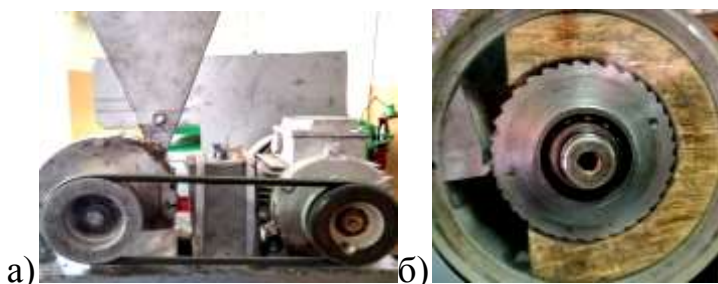


Рисунок 3 - Экспериментальная роторная дробилка (а) и вид её рабочей камеры (б)

исследований по дроблению зернофуража. Исследование измельченных в ней зерновых материалов проводилось на лабораторном рассеве У1-ЕРЛ просеиванием комплектом сит СПП.

Многофакторный эксперимент проводился по трехуровневому плану второго порядка Бокса-Бенкена. На основе полученных аналитических зависимостей, приняты факторы, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Кодирование факторов эксперимента

Показатель	Кодированное обозначение	Факторы и их величина		
		v , м/с	δ , мм	l , мм
Верхний уровень	+1	8	1,5	90
Основной уровень	0	5	1	60
Нижний уровень	-1	2	0,5	30
Интервал варьирования	ΔX	3	0,5	30

Обработка полученных результатов проводилась при помощи разработанной программы в Microsoft Excel 2007.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования усовершенствованной роторной дробилки и их анализ» изложены результаты исследований и проведен их сравнительный анализ.

Таблица 2 - Физико-механические свойства зерновых материалов

	Размеры, мм			Масса 1000 шт., г	W , %	τ , МПа		
	с	b	a			вдоль		поперек
						$z;0;x$	$x;0;y$	
Пшеница	5,99	3,08	2,75	32	11,89	10,7	11,5	8,4
Ячмень	8,64	3,46	2,67	41	12,22	12,5	14,5	4,3
Овес	9,36	2,44	2	31	12,04	9,9	11,4	3,5
Кукуруза	10,01	8,43	4,73	275	10,83	4,6		2,9
σ	0,3...1,1 мм			5,1...48,3 г	2%	2,5...3 МПа		1,5...3 МПа
V , %	8...19			13...17	9...18	19...25		18...26

Получены уточненные физико-механические свойства зерновых материалов. Данные при среднем квадратическом отклонении σ и коэффициенте вариации V не выше 8...26% соответствуют исследованиям других авторов. Влажность зерна W в ходе всех испытаний была не более 14,5% (таблица 2).

Также исследована прочность зерновок пшеницы при статическом разрушении, с изменением зазора между рабочими поверхностями срезающего элемента установки. По результатам эксперимента отмечены изменение разрушающего усилия τ , количества зерновок, измельченных на 3 и более части $N_{3ч}$ и числа целых частиц $N_{ц}$. Критическое напряжение τ зерновки возрастает в среднем с 8,7 МПа при минимальном зазоре и до 11,9 МПа при $\delta = 1,5$ мм. Из-за сложности фиксации зерновок при воздействии на них рабочих поверхностей срезающего элемента появление 5...15% $N_{ц}$ наблюдается уже при $\delta = 1$ мм и увеличивается вплоть до 100% при $\delta > 1,5$ мм. Разрушенные на $N_{3ч}$ зерна есть при

любом зазоре, их количество возрастает от 7% до 15% при рабочем зазоре 1,5 мм, что связано с микротрещинами в зерновках и другими факторами (рисунок 4).

При измельчении зерновок пшеницы в горизонтальной роторной дробилке материала пшеницы исследовано влияние количества противорезов (рифлей) статора $n_{п.с}$ на качество

измельченного продукта при рабочем зазоре $\delta = 0,8$ мм и при частоте вращения ротора ($D = 0,1$ м, $l = 0,06$ м) 1400 мин^{-1} . Опыты показали (рисунок 5), что при увеличении количества рифлей модуль помола M и степень измельчения λ меняются незначительно. Но фактическая результативность измельчения $\Phi_{ри}$ снижается с 24,2 до 9,8. По этим трём оценочным показателям готовый продукт соответствует грубому помолу, но при этом предложенный показатель $\Phi_{ри}$ чувствительнее при изменении выравнинности размера частиц в измельченной массе зерна.

Дробление пшеницы с одним противорезом на статоре (рисунок 6) позволило определить рациональное значение рабочего зазора δ исходя из

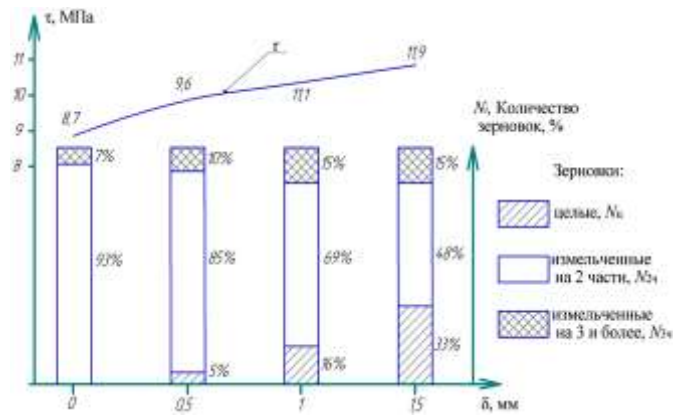


Рисунок 4 - Разрушение зерновок пшеницы при увеличении зазора δ на

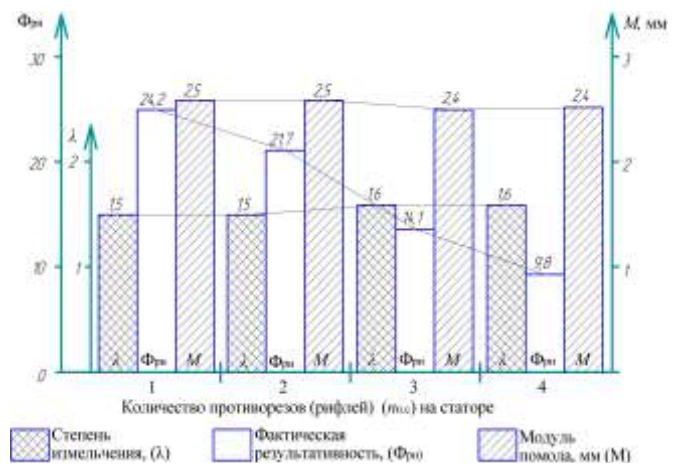


Рисунок 5 - Зависимость качества измельчения от количества рифлей $n_{п.с}$

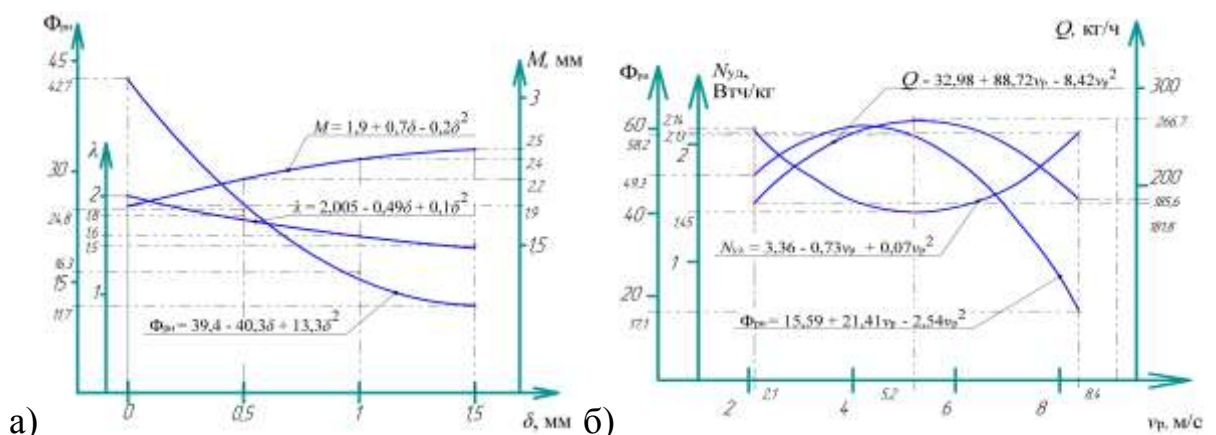


Рисунок 6 - Изменение эффективности измельчения пшеницы от варьирования рабочего зазора δ при $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$ (а) и окружной скорости ротора v_p при $\delta = 0.1$ мм ($D = 0.1$ м. $l = 0.06$ м)

показателей (M , λ , $\Phi_{\text{ри}}$) качества процесса. При минимальном зазоре $\Phi_{\text{ри}} = 42,7$, $M = 1,9$ мм, $\lambda = 2$. С увеличением δ до 1,5 мм, $\Phi_{\text{ри}} = 11,7$, $M = 2,5$ мм, $\lambda = 1,5$, так как готовый продукт насыщен целыми зерновками и пылевидными фракциями материала. Критическую окружную скорость ротора можно принять $v_p = 4,5 \dots 5,5$ м/с ($n = 900 \dots 1000$ мин⁻¹), когда производительность $Q = 245 \dots 266,7$ кг/ч, удельные энергозатраты $N_{\text{уд}} = 2$ Втч/кг, а фактическая результативность $\Phi_{\text{ри}} = 55 \dots 60$. Данные опыты подтвердили возможность разделения исходного продукта на части при одном противорезе на статоре для среднего и грубого помола. При тонком помоле количество рифлей статора можно рекомендовать $n_{\text{т.с}} = 3 \dots 4$.

При реализации многофакторного эксперимента по грубому помолу зерновой смеси (35% ячменя, 17% овса, 24% пшеницы и 24% кукурузы) построены математические зависимости критериев оптимизации Q , P , M , λ , $\Phi_{\text{ри}}$, $N_{\text{уд}}$ от принятых факторов. В раскодированном виде они представлены ниже:

$$Y_{\Phi_{\text{ри}}} = 39,3 - 1,5v_p - 5,5\delta - 0,1v_p^2, \quad (14)$$

$$Y_M = 2,19 - 0,017v_p + 0,12\delta, \quad (15)$$

$$Y_\lambda = 1,43 + 0,01v_p - 0,12\delta, \quad (16)$$

$$Y_Q = 261,6 + 1,4v_p + 0,1l - 2v_p^2, \quad (17)$$

$$Y_P = 361,5 + 1,1l - 0,01l^2 \quad (18)$$

$$Y_{N_{\text{уд}}} = 1,46 + 0,13v_p + 0,012l + 0,012v_p^2 - 0,0001l^2 \quad (19)$$

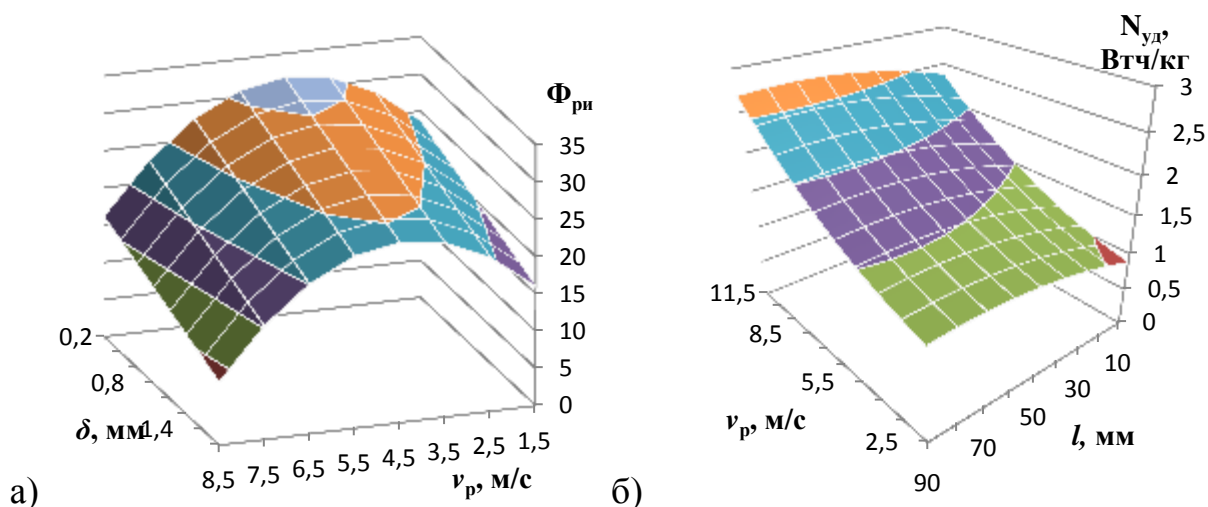


Рисунок 7 – Зависимость $\Phi_{\text{ри}}$ от v_p , м/с и δ , мм (а) и $N_{\text{уд}}$ (б) от v_p , м/с и l , мм

Поверхности отклика уравнений (14) и (19) (рисунок 7) показывают, что $\Phi_{\text{ри}}$ выше при зазоре δ до 0,5 мм и окружной скорости ротора $v_p = 3,6 \dots 5,5$ м/с. При δ выше 1 мм показатель фактической результативности снижается из-за появления недоизмельченных зерновок и за счет образования пылевидных фракций на повышенных угловых скоростях. Оптимальным режимом при $l = 90$ мм можно считать $v_p = 4,5 \dots 6$ м/с, когда $N_{\text{уд}}$ менее 2 Втч/кг, а производительность Q составляет 230...260 кг/ч. При этом установлены рациональные режимы работы:

- грубый помол ($M = 2 \dots 3$ мм): $\delta = 0,4 \dots 0,8$ мм, $v_p = 4,5$ м/с;
- средний помол ($M = 1 \dots 2$ мм): $\delta = 0,3 \dots 0,5$ мм, $v_p = 5,2$ м/с;
- тонкий помол ($M = 0,5 \dots 1$ мм): $\delta = 0 \dots 0,2$ мм, $v_p = 6,5$ м/с.

Наличие в измельченном зерновом материале пылевидной фракции в производственных условиях приводит к потере питательных веществ, содержащихся в ней. Питательность исходного зерна пшеницы и ее пылевидной фракции исследовали в лаборатории Ставропольского филиала ФГБУ Россельхознадзора «Федерального центра оценки безопасности и качества зерна и продуктов его переработки». Массовая доля протеина в целом зерне 12,4%, и 14,1% в перемолоте, что на 13,7% больше. Количество клетчатки в целом зерне 3,4% и 6,2% в перемолотом, что на 82,4% превышает первый показатель. Содержание жира в исходном продукте 2%, а в его пылевидной фракции на 70% выше, и составляет 3,4%.

Данными исследованиями подтверждено, что сбалансированные по питательности корма должны иметь выровненный гранулометрический состав.

При раздельном измельчении зерновых культур в предлагаемой роторной дробилке удельные энергозатраты составили $N_{уд} = 1,3...2$ Втч/кг (рисунок 8).

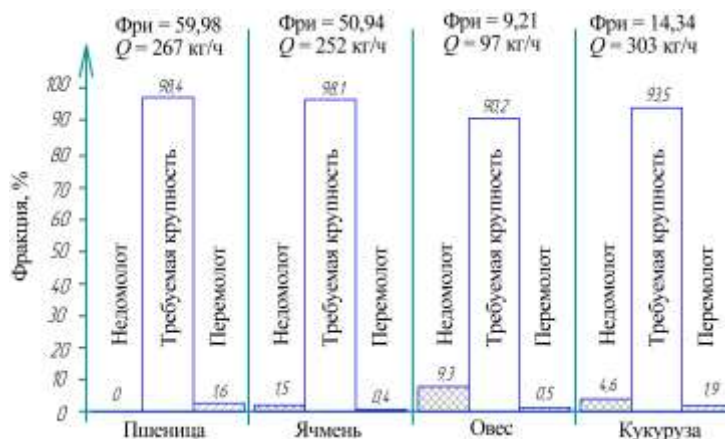


Рисунок 8- Средний помол зерна ($v_p = 5,2$ м/с, $l = 0,09$ м, $\delta = 0,3$ мм)

В соответствии с предложенной методикой представлены рабочие показатели роторной и молотковой дробилки «Зубрёнок» (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительные показатели процесса измельчения смеси зерновых

Дробилка	$\Phi_{ри}$	M, мм	λ	Требуемая крупность, кг	Недомолот, кг	Перемолот, кг	Всего, кг
Роторная	24,6	2,4	1,8	961	0	39	1000
Молотковая	2,6	2,1	2,2	721	104	175	1000

При степени измельчения 1,7 и 1,9, модуле помола 2,5 и 2,2, в роторной и молотковой дробилке, соответственно, измельченное зерно соответствует зоотехническим требованиям и заданному помолу 1,8...2,6 мм. Однако при сравнении по показателю фактической результативности видно, что в молотковой дробилке этот показатель $\Phi_{ри} = 2,6$, что указывает на наличие в измельченной смеси зерновых 27,9% некондиционных фракций.

В пятой главе «Технико-экономическая оценка результатов исследования» приведена оценка экономической эффективности предлагаемой дробилки.

На получение тонны зернового продукта требуемой крупности в машине предлагаемого образца необходимо 1219 руб., что в 3,5 раза меньше чем в молотковой дробилке «Зубрёнок» - 4232 руб. (рисунок 9).



Рисунок 9 - Сравнительные затраты на измельчение 1 тонны продукта

Расчетами подтверждена эффективность применения разработанной горизонтальной роторной дробилки при измельчении зерновых материалов: снижаются эксплуатационные затраты на 28%, удельные энергозатраты на 58%, общая годовая экономия совокупных затрат денежных средств равна 165 780 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Основными направлениями совершенствования процесса измельчения кормового зерна являются совершенствования существующих технологических схем измельчения за счет использования менее энергоемких способов разделения материала на части, снижения длительности воздействия на измельчаемый продукт при дроблении и достижения выравненности в соответствии с зоотехническими требованиями размера частиц готового продукта. Разработанная горизонтальная роторная дробилка представлена самостоятельной сложной технической системой, низшими элементами которой являются рабочие поверхности (рифли) статора и ротора, контактирующие с материалом, целевым назначением которых является создание условий для разделения исходных зерновок на заданное количество частиц до достижения ими, в соответствии с зоотехническими требованиями, необходимого размера. В представленной конструкции реализована энергоэффективная схема разрушения зерновых материалов: заклинивание - воздействие - вывод. Контакт ротора с исходным зерновым продуктом происходит по углу $\gamma_{в,р}$, который определяет не только длительность разделения зерновок до требуемого размера, но и время образования пылевидных фракций. При загрузке зерна организована подача материала в зону среза. При этом взаимное расположение рифлей ротора и статора соответствует схеме - «острие по острию». Новизна предложенных технических решений подтверждена патентами РФ № 155477, № 2545653, № 2546228, № 2552958.

2. Теоретически установлен рациональный диаметр ротора не менее $D_{\min} = 0,062$ м ($D = 0,1$ м). Обоснованы шаг t , высота h и количество n_{π} рифлей: для пшеницы $t = 8$ мм, $h = 1,2$ мм, $n_{\pi} = 38$ шт.; для ячменя $t = 10$ мм, $h = 1,5$ мм, $n_{\pi} = 32$ шт.; для овса $t = 13$ мм, $h = 1,4$ мм, $n_{\pi} = 34$ шт.; для кукурузы $t = 15,5$ мм, $h = 2,4$ мм, $n_{\pi} = 20$ шт. Универсальная нарезка рифлей для одновременного измельчения четырех культур $t = 11,5$ мм, $h = 1,6$ мм, $n_{\pi} = 28$ шт. Обосновано наличие на

статоре одной рифли (противореза) для грубого и среднего помола зерна, при тонком помоле 3...4 шт. Приняты угол острия рифли $\beta = 60^\circ$ и угол наклона стенки паза $\beta_1 = 15^\circ$. Получены аналитические зависимости производительности Q энергоёмкости $N_{уд}$ и качественных составляющих M , λ , $\Phi_{ри}$ от основных конструктивно-режимных параметров дробилки и для различных видов измельчаемых зерновых материалов.

3. Предложена методика оценки эффективности процесса измельчения по показателю фактической результативности, которая позволяет определять выравненность гранулометрического состава и количественно учитывает фактическое соотношение размеров частиц. Для обеспечения равномерности по крупности частиц и количеству некондиционной фракции в соответствии с ГОСТ Р 54379-2011, например для взрослой птицы и КРС, не превышающей 19%, фактическая результативность процесса измельчения зерновых материалов должна быть не менее $\Phi_{ри} = 4,26$.

4. Уточнены физико-механические свойства зерновых материалов при влажности не выше 14,5% и коэффициенте вариации $V = 8...26\%$, соответствующие зафиксированным ранее. Критическое напряжение скалывания составило: пшеница 7,6...11,5 МПа, ячмень 3,8...14,5 МПа, овёс 3,5...11,4 МПа, кукуруза 2,9...4,6 МПа. При реализации многофакторного эксперимента построены математические модели критериев оптимизации и установлены наиболее рациональные режимы работы горизонтальной роторной дробилки для различных помолов:

- грубый помол ($M = 2...3$ мм): $\delta = 0,4...0,8$ мм, $v_p = 4,5$ м/с;
- средний помол ($M = 1...2$ мм): $\delta = 0,3...0,5$ мм, $v_p = 5,2$ м/с;
- тонкий помол ($M = 0,5...1$ мм): $\delta = 0...0,2$ мм, $v_p = 6,5$ м/с.

При отдельном измельчении (средний помол) зернового материала (пшеница, ячмень, овес, кукуруза) в горизонтальной роторной дробилке фракция с частицами требуемого размера составила 91...98%, что соответствует фактической результативности процесса $\Phi_{ри} = 9,2...61,5$, при производительности $Q = 97...267$ кг/ч, $N_{уд} = 1,3...2$ Вт-ч/кг.

5. Расчетами подтверждена эффективность применения горизонтальной роторной дробилки при измельчении зерновых материалов: снижаются эксплуатационные затраты на 28%, удельные энергозатраты на 58%, общая годовая экономия совокупных затрат денежных средств составляет 165 780 руб.

Рекомендации производству

1. Разработанная горизонтальная роторная дробилка может быть использована вместо широко применяемых малогабаритных молотковых зернодробилок, так как у нее снижены эксплуатационные затраты на 28%, удельные энергозатраты на 58% и получено до 98% выровненного по размеру частиц готового продукта, соответствующего зоотехническими требованиями для различных типов помола.

2. Для обеспечения равномерности по крупности частиц и количеству некондиционной фракции в соответствии с ГОСТ Р 54379-2011, например для

взрослой птицы и КРС, не превышающей 19% фактическая результативность процесса измельчения зерновых материалов должна быть не менее $\Phi_{\text{ри}} = 4,26$.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Создание комбинированного измельчителя-смесителя, состоящего из разграниченных рабочих зон по длине ротора, для измельчения различных видов фуражного зерна и последующего их смешивания для получения однородных кормосмесей на базе одной машины.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Искендеров, Р.Р. Молотковые дробилки: достоинства и недостатки / Р.Р. Искендеров, А.Т. Лебедев // Вестник АПК Ставрополя. - 2015. - №1(17). - С. 27-30. (0,56 печ. л./в т.ч. автора 0,28 печ. л.).

2. Искендеров, Р.Р. Экспериментально теоретические подходы к оценке эффективности процесса измельчения зерновых материалов / А.Т. Лебедев, Н.В. Валуев, Р.Р. Искендеров // Вестник АПК Ставрополя. - 2014. - №2(14). - С. 61-64. (0,44 печ. л./в т.ч. автора 0,15 печ. л.).

3. Искендеров, Р.Р. Совершенствование процесса измельчения зерна / Р.Р. Искендеров, В.В. Очинский, А.Т. Лебедев, Р.А. Магомедов, А.С. Шумский // Сельский механизатор. - 2015. - №1. - С. 22-23. (0,38 печ. л./в т.ч. автора 0,1 печ. л.).

4. Искендеров, Р.Р. Методологический подход к обоснованию принципа работы роторной дробилки / Р.Р. Искендеров, В.В. Очинский, А.Т. Лебедев, Р.В. Павлюк // Вестник ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. - 2015. - №3(67). - С. 24-28. (0,5 печ. л./в т.ч. автора 0,18 печ. л.).

5. Искендеров, Р.Р. Элементы проектирования роторной дробилки / Р.Р. Искендеров, В.В. Очинский, А.Т. Лебедев, Р.В. Павлюк // Научная жизнь. - 2014. - №6. - С. 42-49. (0,56 печ. л./в т.ч. 0,14 автора печ. л.).

Публикации в сборниках научных трудов и патентах:

6. Искендеров, Р.Р. Научно-практические аспекты измельчения зерновых материалов / А.Т. Лебедев, В.В. Очинский, Р.Р. Искендеров // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. - 2014. - №3(3). - С.9 -17. (0,7 печ. л./в т.ч. автора 0,35 печ. л.).

7. Искендеров, Р.Р. Измельчение зерновых материалов: проблемы и способы их решения / Р.Р. Искендеров, А.Т. Лебедев, В.В. Очинский // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей «Агроуниверсал-2015». - 2015. - С 19-22. (0,3 печ. л./в т.ч. автора 0,15 печ. л.).

8. Искендеров, Р.Р. Анализ способов измельчения материалов. / А.Т. Лебедев, Р.Р. Искендеров // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей. - 2013. - 221-224с. (0,25 печ. л./в т.ч. автора 0,18 печ. л.).

9. Пат. 155477 Российская Федерация, МПК В 02 С 4/30. Роторная дробилка / А.Т. Лебедев, В.В. Очинский, Р.В. Павлюк, П.А. Лебедев, Р.А. Магомедов, А.В. Захарин, Р.Р. Искендеров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ставропольский ГАУ. № 2014129348/13; заявл. 16.07.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28 (0,3 печ. л./в т.ч. автора 0,15 печ. л.).

10. Пат. 2545653 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/02. Роторная дробилка / А.Т. Лебедев, В.В. Очинский, Р.Р. Искендеров и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ставропольский ГАУ. № 2014100094/13; заявл. 09.01.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10 (0,5 печ. л./в т.ч. автора 0,25 печ. л.).

11. Пат. 2546228 Российская Федерация, МПК В 02 С 4/28. Роторная дробилка / А.Т. Лебедев, В.В. Очинский, Р.Р. Искендеров и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ставропольский ГАУ. № 2013153573/13; заявл. 03.12.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10 (0,44 печ. л./в т.ч. автора 0,18 печ. л.).

12. Пат. 2552958 Российская Федерация, МПК В 02 С 4/10, В 02 С 4/28. Роторная дробилка / А.Т. Лебедев, В.В. Очинский, Р.Р. Искендеров и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ставропольский ГАУ. № 2014108154/13; заявл. 03.03.2014; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16 (0,5 печ. л./в т.ч. автора 0,25 печ. л.).

Подписано в печать 02.05.2017. Формат 60x84 1/16. Гарнитура «Таймс».

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100. Заказ № _____

Отпечатано в типографии издательско-полиграфического комплекса
ФБГОУ ВО «Ставропольский ГАУ» «АГРУС»,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 15.

)