На правах рукописи

Дружинин Роман Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УДАРНО–ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

05.20.01 – технологии и средства механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2014

Работа выполнена на кафедре механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВПО «ВГАУ»)

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор **Труфанов Виктор Васильевич**
Официальные оппоненты:	**Кретов Иван Тихонович,** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры «Машин и аппаратов пищевых производств»
	Панин Иван Григорьевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств», генеральный директор ООО «Авита»
Ведущая организация:	ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности»

Защита состоится 29 января 2015 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВПО «ВГАУ») по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ВГАУ» и на сайте **www.vsau.ru** («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: **http://ds.vsau.ru/?p=1232**.

Автореферат разослан 19 декабря 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 220.010.04 Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В концепции развития животноводства до 2020 г. потребность в фуражном зерне оценивается 38,0 млн. т. К основным потребителям кормового зерна относятся такие отрасли, как скотоводство (48 %), свиноводство (26 %) и птицеводство (20 %).

На данный момент хозяйства практически полностью отказались от покупных комбикормов и стараются наладить их производство непосредственно на местах. Такая организация позволяет существенно снизить издержки на транспортировку сырья и готового продукта, а также рациональнее использовать местные ресурсы. Однако недостаток и несовершенство оборудования привели к тому, что более 50 % потребляемого в хозяйствах кормового зерна дается животным в виде монокорма, что значительно снижает эффективность его использования.

В настоящее время основным оборудованием для измельчения фуражного зерна являются молотковые дробилки. Проблемная ситуация в области измельчения фуражного зерна состоит в том, что, с одной стороны, постоянно растут требования к качеству измельченного зерна, снижению расхода энергии, металла, а традиционные измельчающие устройства и научные знания в этой области не могут обеспечить дальнейшее совершенствование данного процесса. В связи с этим, научная актуальность исследования заключается в необходимости решения вопросов разработки конструкций измельчителей ударно–центробежного действия, позволяющих получать более однородный состав готового продукта, при минимизации энергоемкости процесса. Результатом может быть новая конструктивная разработка с улучшенными рабочими органами, позволяющая реализовать новую технологическую схему разрушения зерна.

Работа выполнена в соответствии с перспективным планом научно – исследовательской работы ФГБОУ ВПО «ВГАУ», тема № 4.2 «Инновационные направления в механизации производства продукции животноводства», номер государственной регистрации 01.200.1–003986.

Степень разработанности темы. Проблемами совершенствования процесса измельчения фуражного зерна занимались российские и зарубежные ученые. Теоретические и практические разработки по измельчению зерна отражены в трудах: С.В. Золотарева, В.А. Денисова, С.В. Мельникова, В.А. Елисеева, Н.С. Дорофеева, Н.Е. Авдеева, В.В. Спорыхина, А.Р. Демидова, В.П. Горячкина, В.В.Труфанова, А.А. Сундеева, В.М. Опрышко, М.Н. Изюмцевой, Ю.Н. Баранова; W. Kruger, E. Silver, A. Hendrix, Р. Риттингер, Ф. Кик, Ф.С. Бонд, Р. Гийо, А.К. Рунквист, П.А. Ребиндер, А.А. Гриффитс, Г. Румпф, Д. Беренс, Е. Рейнерс, В. Эбергардт и др. Данными авторами рассматриваются только отдельные конструктивные параметры дробилок, что не учитывает комплекс технологических параметров агрегатов, удовлетворяющих современным требованиям сельскохозяйственного производства.

При анализе теоретической базы исследований на основе литературных источников было выявлено, что проблемы практики использования современных измельчителей зерновых кормов требует дальнейшего изучения и совершенствования для оптимизации параметров энергозатрат.

Имеющиеся в большинстве аграрных хозяйств измельчители технически не совершенны, в частности имеют ряд недостатков основными из которых являются: не возможность получения продукта надлежащего качества с более выровненным гранулометрическим составом, значительные габариты, большое содержание пылевидной фракции в готовой продукции. Таким образом, устранение вышеотмеченных недостатков возможно при разработке новых типов измельчающих машин, одной из которых является ударно–центробежный измельчитель.

Цель исследования. Повысить эффективность процесса измельчения зерна за счет усовершенствования ударно–центробежного измельчителя.

В соответствии с поставленной целью выдвигаются следующие основные **задачи исследования.**

1. Разработать новое техническое решение ударно–центробежного измельчителя.

2. Разработать аналитические зависимости скорости движения зерна по вертикальной поверхности диска и основанию зуба ножа, а также математическую модель удельной энергоемкости процесса измельчения зерна в ударно–центробежном измельчителе (УЦИ).

3. Обосновать теоретически и экспериментально рациональные конструктивные параметры и режимы работы опытного измельчителя, позволяющие получать материал необходимого качества.

4. Рассчитать экономическую эффективность использования предложенного технического решения.

Объектами исследования является технологический процесс измельчения зерна в УЦИ, его элементы и основные рабочие органы.

Предмет исследования – закономерности влияния основных конструктивных параметров УЦИ на эффективность процесса дробления фуражного зерна.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

– новое техническое решение конструкции ударно–центробежного измельчителя (патент РФ № 2438782);

– аналитические зависимости скорости движения зерна по вертикальной поверхности диска и основанию зуба ножа, а также математическая модель удельной энергоемкости процесса измельчения зерна в ударно–центробежном измельчителе;

– теоретически и экспериментально обоснованные зависимости производительности УЦИ, учитывающие его конструктивные и режимные параметры, повышающие эффективность процесса измельчения зерна, позволяющие получить материал необходимого качества.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при проектировании, настройке и эксплуатации ударно–центробежных дробилок, а также в учебном процессе. Применение предложенной конструкции ударно–центробежного измельчителя позволяет получить готовый продукт зоотехнически требуемого качества с одновременным снижением удельной энерго– и металлоемкости в более чем 1,5 раза по сравнению с существующей и принятой технологией процесса измельчения фуражного зерна.

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследований выполнена с использованием закономерностей и методов теоретической механики, сопротивления материалов и математического анализа. Экспериментальные исследования УЦИ проведены на основании теории планирования многофакторного эксперимента. Результаты обрабатывались с помощью методов математической статистики и пакета прикладных программ.

При проведении экспериментальных исследований ударно–центробежного измельчителя в лабораторных условиях кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» использованы стандартные и частные методики с применением математического моделирования, современных приборов и оборудования. Обработку экспериментальных данных производили с использованием пакета программ Microsoft Office, Statistica 6, Mathcad 15, Maple 14 и др.

На защиту выносятся:

– конструктивно–технологическая схема УЦИ;

– сбалансированные конструктивные параметры и режимы работы предложенного технического решения;

– аналитические зависимости процесса измельчения зерна в УЦИ;

– результаты экспериментальных исследований рабочего процесса УЦИ.

Личный вклад автора Автору принадлежит постановка проблемы и разработка программы исследований, а также непосредственное участие в разработке лабораторного стенда, опытного образца ударно– центробежного измельчителя, проведении экспериментальных исследований в условиях производства и лаборатории кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции в период 2009–2014 гг., анализе, интерпретации и публикации полученных материалов. Сделанные в диссертации выводы и практические рекомендации конкретны и обоснованны.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность подтверждена высокой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, а погрешность опытов составляет не более 5%.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях: профессорско–преподавательского состава агроинженерного факультета ФГБОУ ВПО «ВГАУ» в 2010–2014 годах; всероссийской научной

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в ФГБОУ ВПО «ВГЛТА» в 2010 году; международной заочной научно–практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» в ФГБОУ ВПО «ВГЛТА» в 2014 году. Результаты работы использованы в КФК ИП «Смоляков Г.А.» Хохольского района Воронежской области. Отдельные результаты внедрены в учебный процесс при изучении измельчения зерна в ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе 5 – в изданиях центральной печати, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, общим объемом 2,50 п. л (авторских 1,20 п. л.), получен 1 патент на изобретение РФ № 2438782 «Устройство для измельчения сыпучих материалов».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 177 наименований, из них 7 на иностранных языках, и приложений. Основная часть диссертации изложена на 133 страницах компьютерного текста, включая 43 рисунка и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введении в соответствии с ГОСТ Р 7.01.11–2011 включает: актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи исследований, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, методологию и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов.

В первой главе «Основы процесса измельчения фуражного зерна » представлен анализ состояния и разработанности вопроса. В частности проанализированы технологические требования к фуражным кормам, проведен анализ молотковых дробилок, а также особенностей и конструкций ударно–центробежных измельчителей и их рабочих органов. Предложена классификационная схема характерных конструкции ударно–центробежных измельчителей.

Комплексным изучением механики измельчения материала в ударно–центробежных измельчителях занимались исследователи: Н.И. Гальперин, В.В. Товаров, Г.Н. Оскаленко, И.А. Хинт, В.Н. Блиничев, П.П. Гуюмджан, Н.М. Смирнов, В.А. Денисов, П.И. Леонтьев, Н.С. Сергеев, С.В. Золотарев, и другие и зарубежные: Г. Румпф, Д. Беренс, Е. Рейнерс, В. Эбергардт и др.

Изучение передового опыта показало, что эффективность скармливания можно повысить за счет оптимизации размеров частиц измельченного зерна для каждого вида животных в соответствии с зоотехническими требованиями. Переизмельчение корма негативно сказывается на здоровье и продуктивность животных, увеличивает энергоемкость процесса, ухудшает условия труда человека. Процесс измельчения зерна сложное и недостаточно

изученное явление. Ударные центробежные измельчители фуражного зерна являются новым типом измельчающего оборудования. Они обладают низким удельным расходом энергии затрачиваемой на процесс и меньшей металлоемкостью, чем молотковые дробилки. Их внедрение в производство сдерживается отсутствием методик инженерного расчета и проектирования данных конструкций. Недостаточно высокая эффективность измельчения связана с неравномерностью воздушно–продуктового слоя, поэтому исследованиями установлено, что сепарацию материала эффективнее всего осуществлять в управляемом силовом инерционном поле за счет центробежных сил инерции. Условиям создания и регулирования такого поля отвечают ударно–центробежные измельчители. Ряд технических решений, направленных на повышение показателей работы ударно–центробежных измельчителей заключается в усложнении их конструкции. Повышение эффективности измельчения возможно за счет усовершенствования активных рабочих органов.

При комплексном изучении технических предложений, основным направлением усовершенствования измельчителей кормов ударного действия, является обеспечение надежности и эффективности их работы. В первую очередь, это снижение удельных энергозатрат и получение конечного продукта высокого качества, с минимальным содержанием мелкой и крупной фракции.

Выявлено, что недостатком некоторых предлагаемых учеными схем является то, что одновременно с улучшением отдельных показателей, усложняется конструкция машины, что увеличивает ее стоимость, металлоемкость, предъявляет высокие требования к ремонту и обслуживанию.

Таким образом, на основе проведенного комплексного анализа имеющегося теоретического и практического опыта ученых (литература, патенты и др.) предлагается возможность усовершенствования рабочего процесса ударно–центробежного измельчителя.

Во второй главе «Теоретическое исследование процесса разрушения зерна в ударно–центробежном измельчителе» произведено определение скорости перемещения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа.

Выявлено, что разрушение зерна в измельчителях ударно–центробежного типа осуществляется за счет направленного разгона измельчаемых частиц и последующих ударных и скалывающих воздействий ножей формируемых за счет центробежных сил так и за счет скоростей приобретаемых после удара. Результат разрушения будет наблюдаться в случае совмещения ударного воздействия ножей встречно вращающегося ротора и обеспечение достаточной скорости зерна на разгонном участке первой ступени измельчения. В предложенной конструкции измельчителя имеются два вертикальных диска независимо приводимых в движение навстречу друг другу, на их внутренних поверхностях расположены ударные элементы в виде ножей, концентрически размещенные в рядах.

Рассмотрено зерно как материальная точка с массой m, совершающее движение по вертикальной поверхности диска и основанию зуба ножа.

На элемент массы во время движения по вертикальной поверхности вверх действуют: центробежная сила $F_ц = m\omega^2 x$, сила бокового давления $F_б$, сила трения $F_{тр} = fN$, где N – нормальная реакция стенки, равная $F_б$ и сила тяжести mg.

Уравнение движения элемента массы по вертикальной поверхности примет вид:

$$m\ddot{x} = m\omega^2 x - mg - \gamma\rho(1 - e^{-Кбf(h-x)/\rho})s.$$

С учетом начальных условий мы [6, 8] получили задачу Каши для квазилинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 \cdot x - g - \gamma \cdot \rho\left(1 - e^{-К_б f(h-x)/\rho}\right) \cdot s/m \\ x(0) = x_0 \\ \dot{x}(0) = 0 \end{cases}.$$

Данная задача аналитического решения не имеет и требует численной реализации. Было получено решение этой задачи с помощью встроенных процедур математического пакета Maple.

Следующим этапом является моделирование движения элемента массы по зубу ножа [6].

$$\ddot{y} = -f \cdot 2\dot{y} \cdot \omega \cdot \sin\alpha + (\omega^2 \cdot cos^2\alpha - f \cdot sin\alpha \cdot cos\alpha \cdot \omega^2) \cdot y + \omega^2 \cdot H \cdot cos\alpha - g \cdot cos\alpha - f \cdot sin\alpha \cdot \omega^2 \cdot H + f \cdot sin\alpha \cdot g$$

Данное уравнение с начальными условиями $y(0) = 0, \dot{y}(0) = V_0$ дает нам задачу Коши для линейного неоднородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, в ходе решения которого получаем скорость схода с основания зуба ножа.

$$V_к = c_1 \cdot k1 \cdot e^{k1 \cdot t} + c_2 \cdot k2 \cdot e^{k2 \cdot t}.$$

Для конкретных численных значений: ω – угловая скорость, $с^{-1}$,ω=272 $с^{-1}$;f – коэффициент трения зерна по металлу , f=0,5;g – ускорение свободного падения,$м/с^2$, g=9,81 $м/с^2$; H – длина вертикального участка, м, H=0,04 м; L – длина зуба, м, L=0,025 м;α – угол наклона зуба ножа, α=45˚;$К_б$ – коэффициент бокового давления сыпучего материала, λ= 0,44;m – масса зерна, кг, m=0,00004 кг;ρ — гидравлический радиус поперечного сечений силоса, м, ρ=0,01 м;s – площадь контакта зерна, $м^2$, s=0,000005 $м^2$; γ – удельный вес насыпного зерна, $Н/м^3$; γ=6500 $Н/м^3$.

Решая численным методом задачу Коши для вертикального участка, определяем закон движения элемента массы и его скорость в зависимости от времени.

На рисунке 1 показан закон изменения скорости элемента массы в зависимости от времени. Время движения на вертикальном участке составляет T=0,005 с.

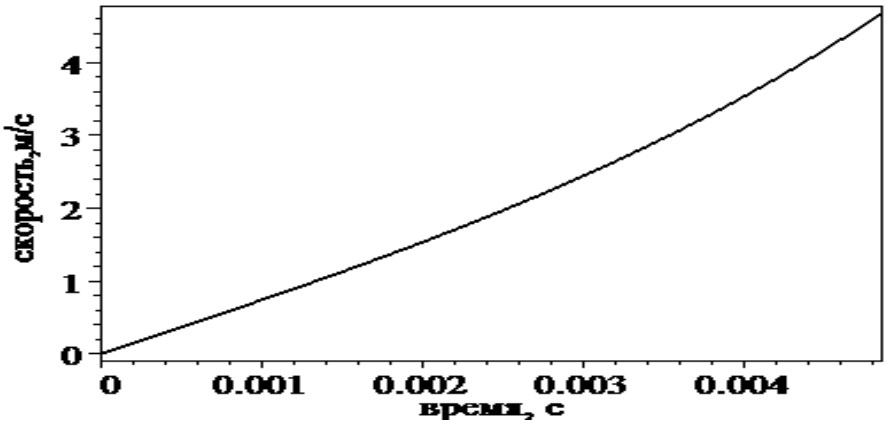


Рисунок 1 – Закон изменения скорости элемента массы в зависимости от времени (движение вверх)

Расчетное время движения по основанию зуба ножа: Т1=0,01 с., минимальная скорость схода элемента массы с основания зуба ножа:

$$V_{кон} = 1{,}81 \cdot e^{70{,}5 \cdot T1} + 7{,}7 \cdot e^{-263 \cdot T1} \Rightarrow V_{кон} = 4{,}17\ м/с.$$

Проведя аналогичные расчеты мы получили, что максимальная скорость при сходе с зуба ножа равняется $V_{кон} = 4{,}22\ м/с$.

Скорости схода частиц с основания зуба ножа в направлениях, отличных от вертикали будут находиться в диапазоне между 4,17 м/с и 4,22 м/с.

Полученные скорости удара изменяется в пределах от 30,6 м/с до 65,7 м/с, что является достаточным условием для разрушения зерновки ячменя.

Для определения производительности вводим в исходную формулу коэффициент заполнения межножевого пространства ($K_з$), определяемый экспериментальным путем, получим:

$$Q = 0{,}9\,\rho \upsilon K_з \frac{(\pi d_э)^2 D_0}{d_э + \delta}$$

Из уравнения видно, что производительность ударно–центробежного измельчителя зависит от диаметра приемной камеры, скорости движения материала по ножу, свойств измельчаемого материала, а также от количества и толщины ножей.

При изменении частоты вращения в пределах от 500 об/мин до 900 об/мин зависимость производительности измельчителя от частоты вращения загрузочного диска представлен на рисунке 2.

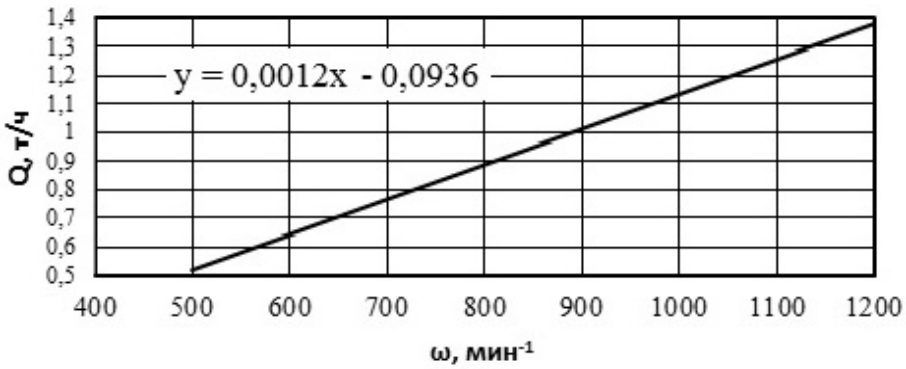
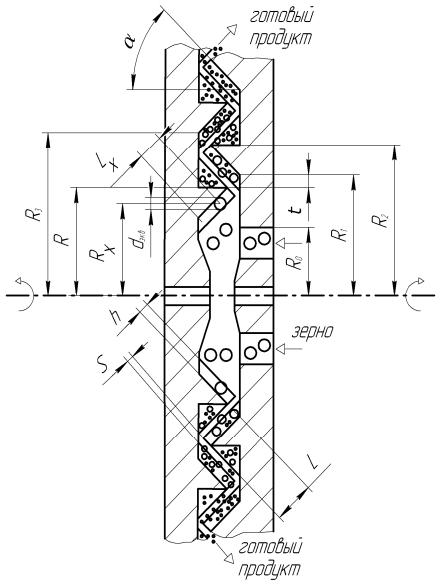


Рисунок 2 – Зависимости производительности от частоты вращения загрузочного диска

Степень измельчения продукта при ударно–скалывающем действии будет зависеть от относительного перемещения частицы по основанию ножа измельчителя за период времени между двумя соседними воздействиями ножей на нее. Величина относительного перемещения частицы x будет равна: $x = \upsilon_{отн} t$, где $\upsilon_{отн.}$ – скорость перемещения частицы по зубу ножа; t – время между соседними воздействиями ножей на частицу. На основании исследований предложена схема движения зерна в измельчителе при величине зазоров $d_э > S$ (рисунок 3).



В данной схеме измельчителя, не изменяя конструктивных и кинематических параметров, можно изменять степень измельчения материала, варьируя зазорами между ножами и окружной скоростью дисков.

Из выведенного выражения:

$$L_x = \frac{R + L\sin\alpha - R_0 - (S + (L + h + d_э)\sin\alpha)}{\sin\alpha}.$$

следует, что с увеличением зазора между ножами величина перемещения материала по нему будет уменьшаться и соответственно, будет уменьшаться скорость схода частичек с плоскости ножа, что в свою очередь скажется на степени измельчения зерна [8].

Рисунок 3– Схема перемещения зернового материала в УЦИ при зазоре меньше эквивалентного диаметра зерновки

Теоретический анализ работы ударно–центробежного измельчителя выявил возможность его работы в широком диапазоне изменения конструктивных параметров. Получены теоретические зависимости скорости движения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа в ударно–центробежном измельчителе, зависящие от угловой частоты вращения дисков и от длины ножа. Определены теоретические зависимости производительности измельчителя, учитывающие его конструктивные и режимные параметры: диаметр приемной камеры, частоту вращения дисков, длину ножа, их количество и толщину, а также свойства измельчаемого материала. На основании теоретических исследований выявлена возможность повышения качества получаемого продукта и производительности в ударно–центробежном измельчителе путем изменения конструктивных параметров ножей. Выявлены основные факторы, влияющие на степень измельчения зерна.

Учитывая сложную структуру зерна и ряд принятых допущений, для подтверждения теоретических предпосылок и выявления, оптимальных конструктивно–режимных параметров ударно–центробежного измельчителя, влияющих на процесс дробления, необходимо провести экспериментальные исследования.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» представлена программа и методика экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях.

С целью проведения экспериментальной оценки технологических показателей предлагаемой конструкции ударно–центробежного измельчителя на кафедре механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВПО «ВГАУ» была смонтирована лабораторная установка, представленная на рисунках 4,5 [4-6, 9, 10].

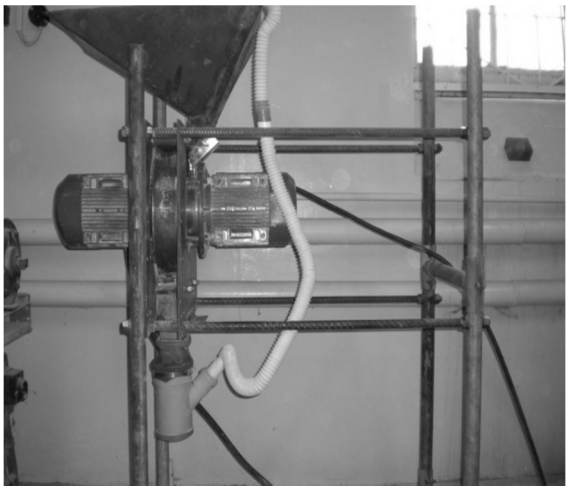


Рисунок 4.– Лабораторная установка ударно–центробежного измельчителя

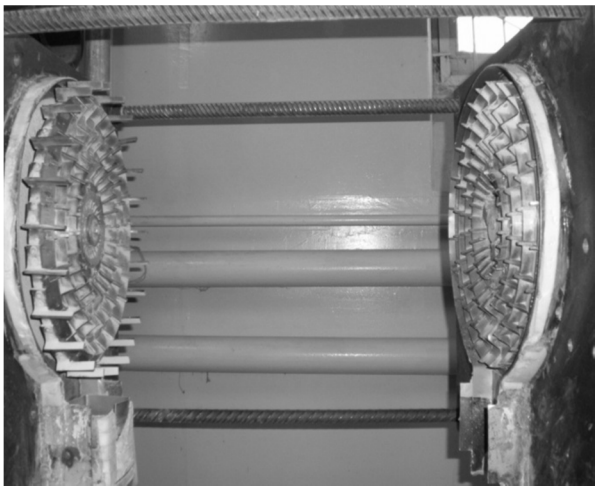


Рисунок 5.– Ударно– центробежный измельчитель в разобранном виде

Для экспериментальных исследований была использована методика планирования эксперимента с применением плана Хартли. Опыты проводились с трехкратной повторностью, порядок проведения опытов определялся рандомизацией. Для построения математических моделей исследуемого процесса был использован известный статистический пакет программ «STATISTICA 6».

На основании поисковых опытов и методов планирования экспериментальных исследований выбрали факторы и уровни их варьирования, выполнили их кодирование и составили матрицу планирования (таблица 1) [4].

Таблица 1 – Условия эксперимента

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования				
			–α	–1	0	+1	+α
1. Частота вращения правого диска N_1,мин$^{-1}$	X_1	52	600	848	900	952	1200
2. Частота вращения левого диска N_2, мин$^{-1}$	X_2	43	2500	2707	2750	2793	3000
3. Зазор, мм	X_3	0,3	3	4,2	4,5	4,8	6
4. Подача материала в камеру дробилки, Q, кг/ч	X_4	35	400	565	600	635	800

Для детального рассмотрения различных моделей исследуемого процесса была использована процедура пошаговой регрессии «Forward stepwise» (вперед по шагам).

Параллельно проводится проверка по критерию Фишера гипотез о незначимости и значимости полученных уравнений регрессии, а также проверка по критерию Стьюдента гипотез о незначимости и значимости отдельных коэффициентов уравнения регрессии.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования ударно–центробежного измельчителя (УЦИ)» экспериментально подтверждены, представлены и проанализированы данные, полученные в лабораторных и производственных условиях.

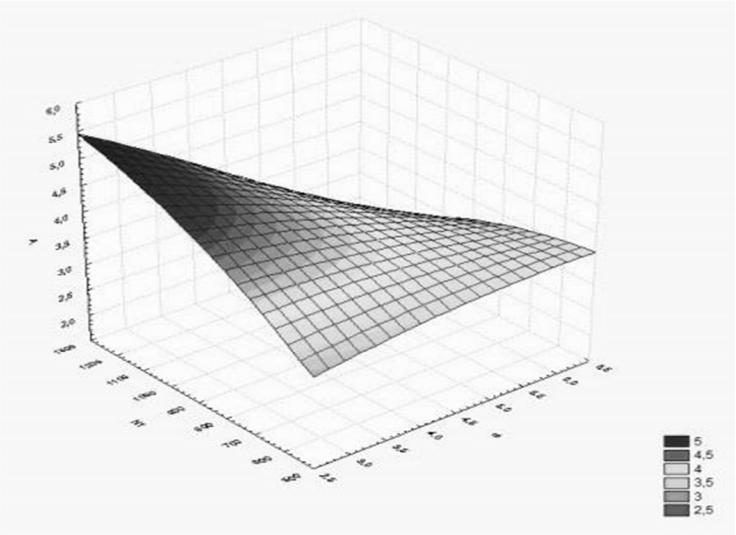
Для получения различных уравнений регрессий предварительно к независимым переменным (S, N_1, N_2, Q) были добавлены факторы их взаимодействий SN_1, SN_2, SQ, N_1N_2, N_1Q, N_2Q и квадратичные эффекты S^2, N_1^2, N_2^2, Q^2. После проведенных математических расчетов получили [1]:

$$Aud = -28{,}04 - 0{,}0016SQ + 0{,}023N_2 + 0{,}001SN_1 - 0{,}000004N_2^2 - 0{,}0000022N_1^2 + 0{,}0000027Q^2 - 0{,}034S^2 .$$

Изменение параметра Aud в пределах от минимального значения 2,5 при значениях S= 3 и N1=600 до максимального значения 5 при значениях S= 2,5 и N1=1300.

Одновременно получено двумерное уравнение регрессии зависимости удельной энергии измельчения Aud от параметров S и N_1 при постоянных значениях других переменных

$$Aud = -1{,}51 + 0{,}949S + 0{,}009N_1 - 0{,}03S^2 - 0{,}0012SN_1 .$$



Для подтверждения предварительного вывода использовался компьютерный пакет программ «MathCad» и в нем модуль «minimize» нахождения минимума функции нескольких переменных.

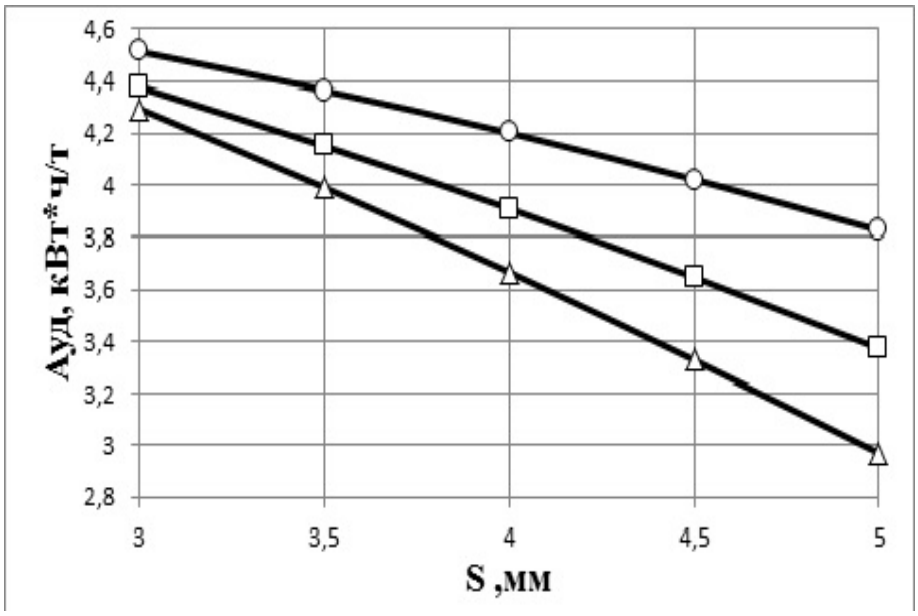
Получено, что минимальное значение параметра Aud равно 3,264 при значениях S=3 и N1=600 до максимального значения 4,177 при значениях S= 3 и N1=1200.

Рисунок 6 – Квадратичная зависимость удельной энергии измельчения (Aud) от зазора (S) и оборотов первого диска (N1)

Аналогичное возрастание Aud наблюдается и с увеличением N_1 и N_2.

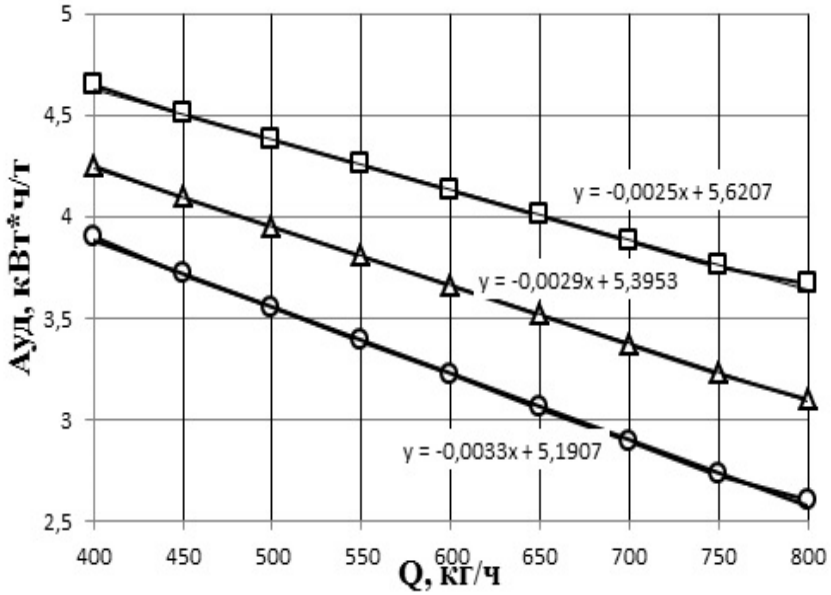
На наш взгляд обороты N1 должны быть приближены к уровню N_1=900 мин$^{-1}$, а N_2=2750 мин$^{-1}$. Изменение удельной энергии измельчения от производительности, зазора между дисками и количества ножей представлен на

рисунках 7,8. Полученные результаты свидетельствуют о снижении Aud при увеличении не только зазора между дисками S, но и производительности Q (рисунок 8).



○ – Q=600 кг/ч; □ – Q=700 кг/ч; Δ – Q=800 кг/ч.

Рисунок 7 – Изменение удельной энергии измельчения (Aud) от зазора (S)



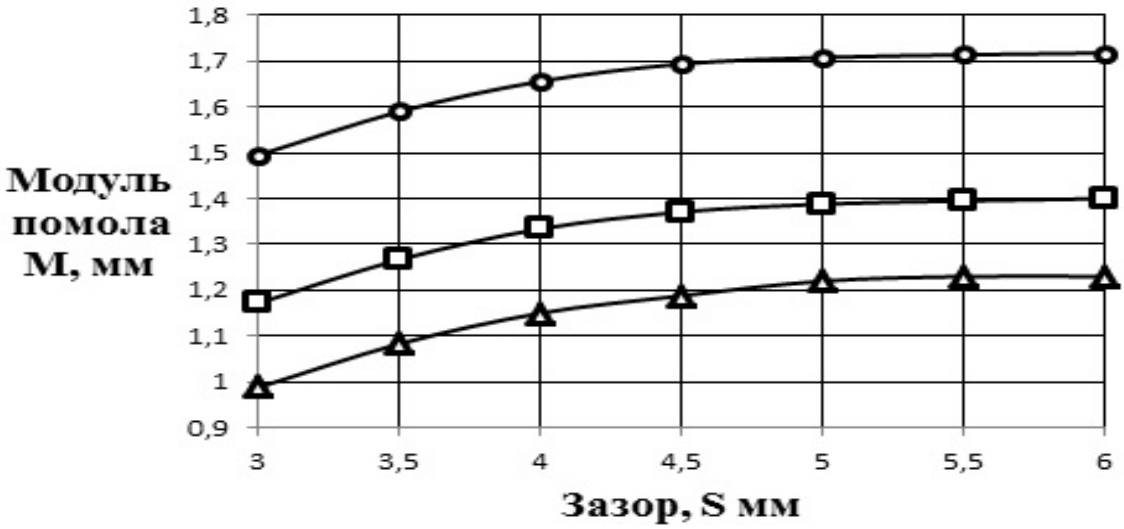
○ – Z=6 шт.; Δ – Z=12 шт.;□ – Z=24 шт.

Рисунок 8 – Изменение удельной энергии измельчения(Aud)от производительности (Q) при разном количестве ножей (Z)

В диапазоне изменения частоты N_1 от 600 до 1200 мин$^{-1}$ модуль помола изменяется в большую сторону и это изменение при зазоре между дисками 3,5 мм. составило 1,5 – 1,6 мм. Однако изменение зазора до 3 мм. позволяет получить модуль помола менее 1 мм.

Экспериментальные данные зависимости модуля помола от зазора между дисками и величины подачи материала свидетельствуют о возраста-

нии этого показателя с увеличением зазора S и подачи Q при увеличении частоты вращения N1.



○ – N1=600 мин$^{-1}$; □ – N1=900 мин$^{-1}$; Δ – N1=1200 мин$^{-1}$.

Рисунок 9 – Зависимость модуля помола (М) от зазора (S) между дисками

Результаты удельного расхода электроэнергии в зависимости от модуля помола при измельчении ячменя в ударно–центробежном измельчителе и дробилке КДУ-2 представлены на рисунке 10.

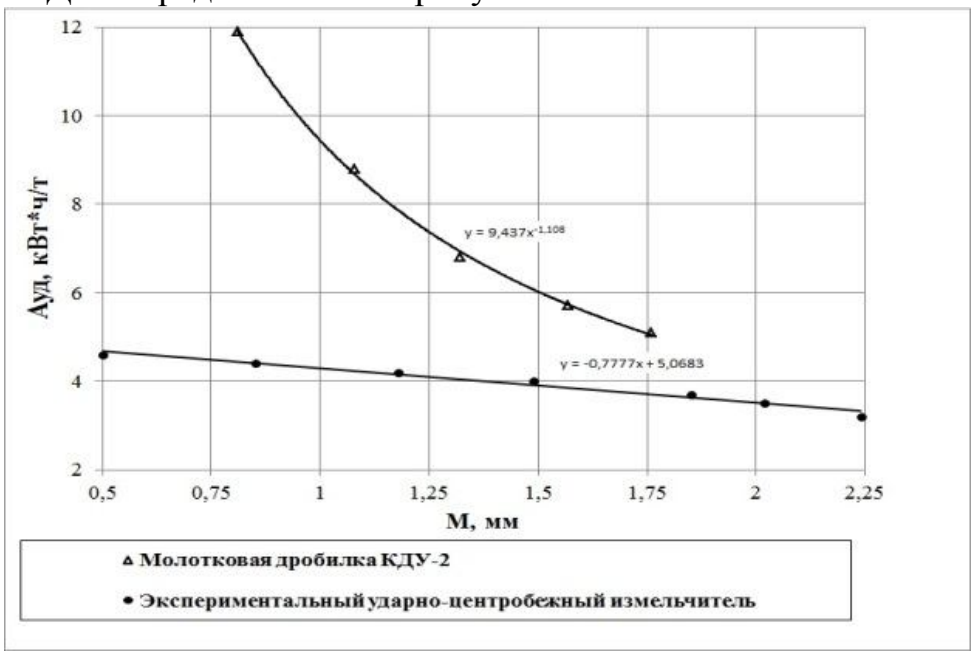


Рисунок 10 – Сравнительные результаты удельного расхода электроэнергии от модуля помола

При одинаковом модуле помола 0,81 (мелкий), 1,18 (средний) и 2,2 (крупный) наблюдается тенденция большого расхода удельной энергии при использовании молотковой дробилки, причем при мелком измельчении затрачивается удельной энергии в 2,69 раза больше. При среднем измельчении разница расхода энергии на процесс уменьшается до величины 1,9, но остается существенной для процесса измельчения зерна для КРС.

При анализе критериев оптимизации использовались уравнения регрессии, полученные математической обработкой результатов многофакторного эксперимента. В ходе анализа результатов активного эксперимента, полученных уравнений регрессии и аппроксимирующих их поверхностей отклика определено, что все факторы значимо влияют на показатели эффективности процесса.

Таблица 2 – Итоговые уравнения регрессии удельной энергоемкости (Aud), энергии процесса измельчения зерна (Эиз), модуля помола (М), степени измельчения зерна (λ)

1. $Aud = -28{,}04 - 0{,}0016SQ + 0{,}023N_2 + 0{,}001SN_1 - 0{,}000004N_2^2 - 0{,}000002N_1^2 + 0{,}000003Q^2 - -0{,}034S^2$; $R^2 = 0{,}94$.
2. $Эиз = 1{,}43 - 0{,}00001N_1Q - 0{,}0027SQ - 0{,}0000015N_2Q - 0{,}059S^2 + 0{,}0082N_1 - 1{,}17S$; $R^2 = 0{,}83$.
3. $M = 8{,}19 - 0{,}00000081N_1N_2 + 0{,}00000077N_1^2 - 0{,}0000023Q^2 + 0{,}0027SQ - 0{,}057S^2 - 0{,}01Q - - 1{,}055S$; $R^2 = 0{,}84$.
4. $\lambda = -0{,}19 + 0{,}00000065N_1N_2 + 0{,}0000018N_2Q - 0{,}0025SQ + 0{,}15S^2 + 0{,}0000064Q^2$; $R^2 = 0{,}82$.

При выборе оборотов второго диска (N_2) останавливаемся на значении N_2=2750 мин$^{-1}$ в диапазоне 2700–2800 мин$^{-1}$. Обороты загружающего диска (N_1) принимаем N_1=900 мин$^{-1}$.

По результатам исследований величина зазора среднего значения модуля помола для КРС должна находиться в пределах S=4 – 4,5 мм., хотя уменьшение зазора скажется на затраты энергии. Оптимальной загрузкой можно считать Q=700 – 800 кг/ч.

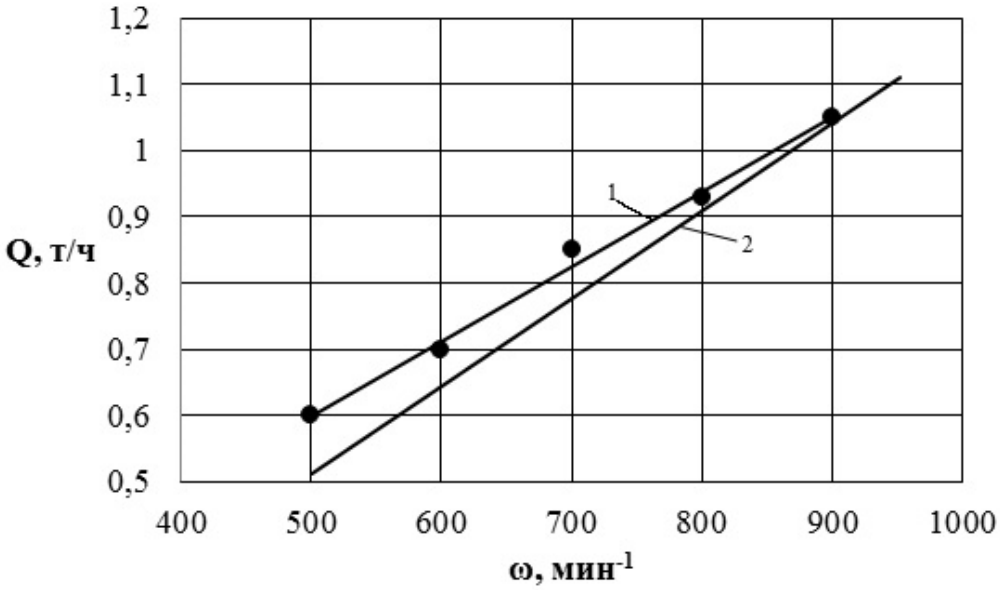
Данные для определения рациональных значений исследуемых факторов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные для определения рациональных значений исследуемых факторов

Факторы	Оптимальные значения факторов по исследуемым функциям			Решение
	Aud	Эиз	M	
X_1	–1,21	–1,21	0	–1
N1, мин$^{-1}$	600–800	600–800	800–900	900
X_2	0	0	0	0
N2, мин$^{-1}$	2700–2800	2700–2800	2700–2800	2700–2800
X_3	+1,21	+1,21	0	0
S, мм	5–6	5–6	4–4,5	4–4,5
X_4	+1,21	+1,21	+1,21	+1,21
Q, кг/ч	700–800	700–800	700–800	700–800

В ходе эксперимента доказана зависимость теоретической и фактической производительности от оборотов загрузочного диска (рисунок 11).

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что окружная скорость существенно влияет на производительность, которая изменяться в пределах от 600 кг/ч до 1050 кг/ч.



1– экспериментальная; 2– теоретическая

Рисунок 11 – Влияние частоты вращения загрузочного диска на производительность УЦИ

Расхождение в полученных результатах экспериментальным и теоретическим путем не превышает более 8% при малой производительности, а при достижении максимальной производительности отклонение составило менее 1%. При частоте вращения загрузочного диска до 900 мин$^{-1}$ фактическое значение производительности больше теоретической.

В пятой главе «Производственная проверка и экономическая эффективность ударно– центробежного измельчителя» приведена проверка работоспособности УЦИ в условиях производства проводилась в дробильном цехе КФХ ИП «Смольяков Г.А.» Хохольского района Воронежской области.

В качестве сравнения была использована серийная дробилка КДУ – 2, применяемая в цехе для измельчения зерновых продуктов.

Установленная мощность УЦИ сокращается в 1,7 раза, часовая выработка по сырью возрастает на 20 %, коэффициент использования мощности электродвигателя повышается на 7 %. Стоимость трех установок УЦИ по сравнению с КДУ – 2 снижается на 37,3 тыс. руб.

Из результатов производственной проверки УЦИ видно, что его показатели по сравнению с молотковой дробилкой КДУ – 2 значительно лучше, так как удельные затраты электроэнергии в два раза ниже при более мелком помоле. Годовой экономический эффект составит 78,93 тыс. руб. (в ценах 2014г), коэффициент эффективности вложений будет значительно выше действующей ставки процента банка, а проект окупится за 3,8 года.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Эффективность скармливания можно повысить за счет оптимизации размеров частиц измельченного зерна для каждого вида животных в соответствии с зоотехническими требованиями. Переизмельчение корма негативно сказывается на здоровье и продуктивность животных, увеличивает энергоемкость процесса, ухудшает условия труда человека. Процесс измельчения зерна сложное и недостаточно изученное явление. Сложившиеся полученные знания не позволяют однозначно ответить на многие принципиальные вопросы, например о числе и скорости удара, необходимых для полного разрушения зерновки.

2. Ударные центробежные измельчители фуражного зерна являются новым типом измельчающего оборудования. Они обладают низким удельным расходом энергии затрачиваемой на процесс и меньшей металлоемкостью, чем молотковые дробилки. Их внедрение в производство сдерживается отсутствием методик инженерного расчета и проектирования данных конструкций.

3. Разработана математическая модель процесса измельчения зерна, позволяющая определить скорость движения зерна по вертикальной поверхности загрузочной камеры измельчителя и основанию зуба ножа, в большей степени зависящая от угловой частоты вращения дисков и от величины перемещения зерновки. В дальнейших расчетах скорость при сходе с зуба ножа была принята равной $V_{кон}$ = 4,2 м/с. Скорости удара зерновки с рабочими элементами последующих ступеней измельчителя на выходе из измельчителя равняется 65,7 м/с.

4. Установлена аналитическая зависимость производительности измельчителя, учитывающая его конструктивные и режимные параметры: диаметр приемной камеры (D_0, м), частоту вращения дисков (ω, $с^{-1}$), длину ножа (L, м), их количество (Z, шт) и толщину (δ, м), а также степень заполнения междискового пространства ($К_з$) и свойства измельчаемого материала.

5. По результатам экспериментальных исследований определены рациональные значения исследуемых параметров, при которых обеспечиваются тонкий, средний и крупный помол. Так при тонком помоле (М=0,6-0,8 мм.) необходимо устанавливать зазор в пределах S=3мм., а при среднем помоле (М=1,0-1,8 мм.) величина зазора S=4мм., при крупном помоле (М=1,8-2,2 мм.) величина зазора S=5мм.. Частота вращения загрузочного диска N_1=900 $мин^{-1}$ и отбойного N_2=2750 $мин^{-1}$ позволяют вести процесс измельчения с содержанием пылевидных частиц не более 5 %, исключив из полученной массы целые зерна.

6. Предложена новая конструкция УЦИ (патент РФ № 2438782) обеспечивает высокие показатели качества измельчения, низкую энергоемкость процесса, достигаемые за счет обоснованного выбора рациональных, режимных и конструктивных параметров, а именно: количество ножей – 24 шт.; максимальный диаметров дисков – 320 мм.; диаметр загрузочной камеры – 100 мм.; частота вращения загрузочного диска – 900 $мин^{-1}$; частота вращения

отбойного диска – 2750 мин$^{-1}$; зазор между ножами дисков при тонком помоле – 3 мм., среднем помоле – 4мм., крупном помоле – 5 мм..

7. На совмещенных графиках теоретической и фактической производительности (см. рисунок 4.15) видно, что фактическая производительность существенно зависит от частоты вращения загрузочного диска и при частоте 900 мин$^{-1}$ достигает максимального значения 1050 кг/ч. Расхождение в полученных результатах экспериментальным и теоретическим путем не превышает 8 %, а при достижении максимальной производительности разница в результатах составила менее 1 процента.

8. Готовый продукт имеет более выравненную структуру гранулометрического состава в отличие от серийной дробилки, а также соответствует ГОСТу на комбикорма. При одинаковом модуле помола 0,81 (мелкий), 1,18 (средний) и 2,2 (крупный) наблюдается тенденция большого расхода удельной энергии при использовании молотковой дробилки, причем при мелком измельчении затрачивается удельной энергии в 2,69 раза больше. При среднем измельчении разница расхода энергии на процесс уменьшается до величины 1,9, но остается существенной.

9. Экономический эффект от внедрения УЦИ составляет 78,93 тысяч рублей, размер экономического эффекта за срок службы составляет 1617 тысяч рублей, коэффициент эффективности вложений будет значительно выше действующей ставки процента банка, а проект окупится за 3,8 года.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи в рецензированных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Математическая модель удельной энергоемкости процесса измельчения зерна / В.В.Труфанов, Н.Ф. Скурятин, Р.А. Дружинин и др. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета: теоретический и научно–практический журнал.–Воронеж: ВГАУ, 2012. – № 2 – С.129-131.

2. Повышение эффективности дисковой мельницы / В.В.Труфанов, М.Н. Яровой, Р.А. Дружинин и др. // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 4 – С.6-8.

3. Теоретические зависимости сепарации измельченного зерна по конусной перфорированной поверхности / В.В.Труфанов, Е.А. Андрианов, Р.А. Дружинин и др. // Лесотехнический журнал.–Воронеж: ВГЛТА, 2013. – № 3 – С.164-170.

4. Труфанов В.В. Снижение удельной энергии дробления ударно–центробежного измельчителя / В.В.Труфанов, Р.А. Дружинин, Е.С. Тарабрин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета: теоретический и научно–практический журнал.–Воронеж: ВГАУ, 2013.– № 2 – С.277–281.

5. Труфанов В.В. Совершенствование устройства для измельчения сыпучих материалов ударно–центробежного типа / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета: теоретический и научно–практический журнал. – Воронеж: ВГАУ, 2011. – № 1 – С.39-42.

Статьи в других изданиях:

6. Определение скорости перемещения зерна по вертикальной поверхности диска и зубу ножа в ударно–центробежном измельчителе / В.В. Труфанов, Р.А. Дружинин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика // Материалы международной заочной научно–практической конференции. – Воронеж, 2014. – С. 490-494.

7. Совершенствование конструкции дискового измельчителя фуражного зерна / Р.А. Дружинин, А.С. Корнев // Инновационные технологии и технические средства для АПК // Материалы всероссийской научно–практической кон–ференции молодых ученых и специалистов, посвященные 100–летию ВГАУ им. императора Петра I. – Воронеж, 2012. – С. 140-143.

8. Труфанов В.В. Исследование влияния конструктивных и технологических параметров на процесс измельчения в измельчителе ударно–центробежного типа / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, Р.А. Дружинин // Вестник Мичуринского филиала Российского университета кооперации: научно–производственный журнал. – Мичуринск: 2011. – № 2 – С.62-67.

9. Устройство для измельчения сыпучих материалов / В.В. Труфанов, В.М. Опрышко, Р.А. Дружинин и др. // Вестник Мичуринского филиала Российского университета кооперации: научно–производственный журнал. – Мичуринск: 2011. – № 2 – С.75-78.

Патенты:

10. Пат. 2438782 Российская Федерация, МПК B02C7/02. Устройство для измельчения сыпучих материалов [Текст] / Труфанов В.В., Яровой М.Н., Дружинин Р.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежский государственный аграрный университет имени К.Д. Глинки» (RU). – № 2010113075/03; заявл. 05.04.2010, опубл. 10.01.2012. Бюл. № 1. – 5 с. : ил.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учёному секретарю. Телефон (473) 253-75-35, e-mail: **et@agroeng.vsau.ru.**

Дружинин Роман Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УДАРНО–ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.11.2014 г. Формат 60х80 $^{1}/_{16}$
Бумага кн.-журн. П.л. 1,05 Гарнитура Таймс.
Тираж 100 экз. Заказ № 11021
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»
Типография ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1