

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Объект авторского права

УДК 631.363.2

**ДРОЗД
Сергей Александрович**

**СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ
ДВУХСТАДИЙНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ ЗЕРНОФУРАЖА
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМБИКОРМОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства
(технические науки)

Минск, 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Научный руководитель –

Воробьёв Николай Александрович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Китиков Вадим Олегович, доктор технических наук, профессор, директор государственного научного учреждения «Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси»

Гутман Василий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии учреждения образования «Барановичский государственный университет»

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Белорусская государственная орден Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»

Защита состоится «24» ноября 2023 г. в 12⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 05.31.02 при учреждении образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» по адресу: 220012, г. Минск, пр-т Независимости, 99, корп. 1, ауд. 317, e-mail: rektorat@bsatu.by, science@bsatu.by, тел. (8-017) 272 34 04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Автореферат разослан «24» октября 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 05.31.02,
кандидат технических наук, доцент



И.С. Крук

ВВЕДЕНИЕ

Доля сельского хозяйства в производстве валового внутреннего продукта Республики Беларусь в 2021 году составила 6,8 %, при этом отрасль является экспортноориентированной с долей 16,9 %. В структуре продукции сельского хозяйства Республики Беларусь приоритет принадлежит животноводству, доля которого составляет 53,1 %.

Устойчивым фактором развития животноводства является применение отечественных высокоэнергетических комбикормов, объем которых необходимо ежегодно увеличивать для обеспечения роста производства продукции животноводства.

Один из самых важных компонентов комбикорма – зернофураж. Ключевой технологической операцией производства комбикорма является его измельчение, необходимое для обеспечения усвояемости питательных веществ животными. Объем измельчения зернофуража в Республике Беларусь ежегодно составляет около 4 млн т.

Вместе с тем в отечественном производстве комбикормов существует ряд проблем, одна из которых – высокие энергетические затраты, связанные, в первую очередь, с процессом измельчения зернофуража, имеющие удельный вес до 70 % удельных энергозатрат при производстве комбикормов.

Анализ исследований в данной области показал, что одним из путей совершенствования процесса измельчения зернофуража является применение комбинированного воздействия различными рабочими органами на зерно, то есть применение метода двухстадийного измельчения, включающего в себя поэтапный пропуск зернового материала через два конструктивно различных измельчителя.

Данная диссертационная работа посвящена решению проблемы снижения удельных энергозатрат при производстве комбикормов путем применения метода двухстадийного измельчения зернофуража с обоснованием параметров и режимов работы вальцового и вертикального молоткового измельчителя, что является важной народнохозяйственной задачей, успешное решение которой создает предпосылки для повышения конкурентоспособности мясомолочной отрасли Республики Беларусь.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с Государственной научно-технической программой «Механизация производства основных сельскохозяйственных культур» на 2011–2015 годы по заданию Ж 2.5.6 «Обосновать основные параметры, разработать и освоить в производстве вальцовую дробилку зерна производительностью не менее 3 т/ч для реконструируемых и вновь разрабатываемых установок для производства комбикормов (кормосмесей) в условиях хозяйств», с Государственной программой научных исследований «Инновационные технологии в АПК» на 2011–2015 годы по заданию 4.81 «Исследование процесса измельчения фуражных зернобобовых культур с целью создания энергоэффективных машин для переработки кормов». Данные программы выполнялись совместно с РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства».

Выполнялись работы по договору с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований № Т15М-106 «Исследование процесса двухстадийного измельчения зернофуража с целью создания энергоэффективных машин для переработки кормов»; а также инициативные проекты: «Повышение эффективности переработки зернового материала на пищевые и кормовые цели» (в соответствии с планом НИР БГАТУ на 2011–2015 годы), «Обосновать конструктивные и технологические параметры двухстадийного измельчителя зернофуража, обеспечивающего снижение энергоемкости процесса и улучшение гранулометрического состава корма» (в соответствии с планом НИР БГАТУ на 2016–2020 годы).

Цель, задачи, объект и предмет исследования.

Цель исследования – снижение удельных энергозатрат при производстве комбикормов путем применения метода двухстадийного измельчения зернофуража с обоснованием параметров и режимов работы вальцового и вертикального молоткового измельчителя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить аналитический обзор состояния вопроса измельчения зернофуража при производстве комбикормов.
2. Теоретически исследовать метод двухстадийного измельчения зернофуража с учетом физико-механических свойств зерна.
3. Экспериментально исследовать метод двухстадийного измельчения зернофуража рабочими органами машин на первой и второй стадии измельчения, определить рациональные параметры и режимы работы вальцового и вертикального молоткового измельчителей по критерию удельных энергозатрат измельчения зерна.
4. Обосновать метод двухстадийного измельчения зернофуража и реализовать усовершенствованный процесс, основанный на этом методе и позволяющий снизить удельные энергозатраты.
5. Разработать методику инженерного расчета основных параметров и режимов работы машин для двухстадийного измельчения зернофуража.
6. Провести производственную проверку усовершенствованного процесса измельчения зерна и определить его экономическую эффективность.

Объект исследований – способы и средства измельчения зернофуража.

Предмет исследований – удельные энергозатраты измельчения зернофуража.

Научная новизна заключается в экспериментально-теоретическом обосновании нового метода измельчения зернофуража при последовательном совмещении статического (давление) – в вальцовом измельчителе и динамического (удар) – в молотковом измельчителе видов деформации зерна, который приводит к синергетическому эффекту, обеспечивающему снижение удельных энергозатрат процесса на 30 %...46 % при получении требуемой фракции содержанием не менее 95 %, и в получении зависимостей, позволяющих определить конструктивные (межвальцовый зазор, количество загрузочных отверстий, диаметр отверстий в решетке) и технологические (скорость деформации зерна, соотношение скоростей вальцов, скорость подачи зерна на вторую стадию) характеристики оборудования при

соблюдении требований к производительности и качеству измельчения для различных зерновых культур (пшеница, рожь, тритикале, ячмень, овес), а также в разработке методики инженерного расчета основных конструктивных параметров и режимов работы оборудования для двухстадийного измельчения зернофуража для кормления КРС, свиней и птицы.

Новизна разработанных технических решений подтверждается патентом на изобретение Республики Беларусь на способ и устройство № 23315.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости, описывающие метод двухстадийного измельчения зернофуража, учитывающие физико-механические свойства зерна и позволяющие определить:

- значения межвальцового зазора, соотношения скоростей валцов и скорости деформации зерна, с учетом размера зерна, радиуса, окружной скорости и профиля рифленной поверхности валцов, исключая компрессионное сжатие и разделение зерна на части на первой стадии измельчения;

- значение скорости подачи зерна на вторую стадию измельчения с учетом диаметра молоткового ротора, количества пакетов молотков, скорости молотков до соударения с зерном, обеспечивающие подачу зерна в рабочую зону молотковой камеры на высоту пакета молотков;

- значение коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии, учитывающее степень деформации зерна на первой стадии измельчения;

- значения количества загрузочных отверстий камеры измельчения и угла наклона передней грани рифли деки для обеспечения удара зерна о деку под прямым углом, учитывающие радиус камеры, места расположения и размер загрузочных отверстий, обеспечивающие равномерной загрузки второй стадии измельчения.

2. Уравнения регрессии, позволяющие установить: зависимости функциональных и энергетических показателей двухстадийного измельчения зерна от межвальцового зазора на первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решете на второй стадии; рациональные значения межвальцового зазора и диаметра отверстия в решете, обеспечивающие снижение удельных энергозатрат.

3. Метод двухстадийного измельчения зернофуража и усовершенствованный процесс, основанный на этом методе, при котором на первой стадии осуществляется деформация зерна со сдвигом, исключая компрессионное сжатие зерна за счет вращения валцов с разными окружными скоростями, на второй – измельчение зерен молотковым измельчителем с вертикальной осью вращения, при котором за счет синергетического эффекта происходит снижение удельных энергозатрат по результатам экспериментальных исследований на 30 %...46 %, в зависимости от требуемой степени измельчения.

4. Методика инженерного расчета основных параметров и режимов работы машин для двухстадийного измельчения зернофуража (величина межвальцового зазора, длина валцов, соотношение скоростей валцов,

диаметр отверстий в решетке, диаметр молоткового ротора, высота пакета молотков, окружная скорость на концах молотков, мощность привода на перелоток и второй стадии в зависимости от требуемой производительности и показателя качества измельчения), которая позволяет определить функциональные показатели процесса измельчения для разных видов зерновых (пшеница, рожь, тритикале, ячмень, овес): удельные энергозатраты, степень измельчения, средневзвешенный размер частиц, однородность измельчения.

5. Результаты практической реализации выполненных исследований и экономическая эффективность применения двухстадийного измельчения зернофуража вальцовым и вертикальным молотковым измельчителем, обеспечивающие расчетное снижение удельных затрат на 0,52 рубля на тонну переработанного зерна.

Личный вклад соискателя заключается в самостоятельном проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, разработке методики инженерного расчета, выполнении конструкторских разработок, подготовке публикаций и научных докладов, реализации результатов исследований. Постановка цели и задач диссертационной работы, разъяснение полученных научных результатов, защита технической новизны патентом выполнена совместно с научным руководителем Н.А. Воробьевым. Обсуждение публикаций по диссертационной работе проводилось с научным руководителем при участии В.Н. Дашкова, А.И. Пунько.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты диссертационной работы были доложены на Международных научно-практических конференциях: «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции» (Минск, БГАТУ, 2013, 2017, 2019, 2021 гг.); «Перспективная техника и технологии в АПК» (Минск, БГАТУ, 2016 г.); «Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК» (Минск, БГАТУ, 2019 г.); «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, БГАТУ, 2019 г.). Результаты исследования внедрены: на РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи»; в БГАТУ.

Опубликование результатов диссертации. По теме диссертации опубликована 51 научная работа, из них: 15 статей (общим объемом 4,88 авторского листа) – в журналах и сборниках, рекомендованных ВАК Республики Беларусь, 32 статьи (общим объемом 7,5 авторского листа) – в материалах научных конференций и зарубежных сборниках научных работ; 2 статьи (общим объемом 0,13 авторского листа) – в сборниках тезисов докладов, 1 патент на полезную модель и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 249 страниц и включает 85 рисунков, 16 таблиц, список использованных источников из 147 наименований (в том числе 51 публикации соискателя) на 13 страницах, а также 9 приложений на 76 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведен аналитический обзор состояния вопроса, на основании которого установлено, что в себестоимости животноводческой продукции корма составляют 51 %...68 %. При этом наибольшей стоимостью обладают концентрированные корма, которые в балансе кормов птицеводства составляют 93 %, в свиноводстве – 90 %, при выращивании КРС в летний период – 15 %...20 % и в зимний период – 40 %...50 %. Зернофураж в рецептуре комбикорма по количественному признаку является основным компонентом, его измельчение – ключевым технологическим этапом, удельные энергозатраты которого доходят до 70 % от энергозатрат всей технологии производства комбикорма.

Анализ требований к качеству измельчения зернофуража для приготовления комбикормов показал, что размер требуемой фракции измельченного зерна для различных видов животных составляет: для свиней – 0...2 мм (СТБ 2111–2010) и 0...3 мм (ГОСТ 13299–71; ГОСТ 9267–68; ГОСТ 16955–2015; ГОСТ 21055–2019); для КРС – 0...2 мм при откорме в животноводческих комплексах и 0...3 мм при откорме в хозяйствах (СТБ 1842–2008, ГОСТ 18221–2018); для перепелов, молодняка сельскохозяйственной птицы, включая цыплят-бройлеров, – 0...3 мм (СТБ 1842–2008); для взрослой сельскохозяйственной птицы 3...5 мм (СТБ 1842–2008).

Установлено, что на величину сил, разрушающих зерно, оказывают влияние его геометрические размеры, вид, анатомическое строение, а также влажность.

Исследованием процессов измельчения зернофуража, воздействия рабочих органов и создания конструкций измельчителей занимались В.А. Афанасьев, В.Н. Дашков, Н.С. Дорофеев, В.А. Елисеев, В.О. Китиков, А.В. Китун, С.И. Козлов, П.Ю. Крупенин, В.А. Одегов, Ю.А. Пономаренко, В.И. Передня, А.И. Пунько, А.А. Романович, В.Н. Савиных, А.А. Сундеев, В.И. Сыроватка, А.В. Червяков, В.А., Шаршунов, И.Н. Шило и др.

Анализ работ перечисленных исследователей позволил выбрать наиболее эффективное оборудование для реализации метода двухстадийного измельчения зернофуража: для первой стадии – вальцовый измельчитель, для второй – вертикальный молотковый измельчитель (рисунок 1).

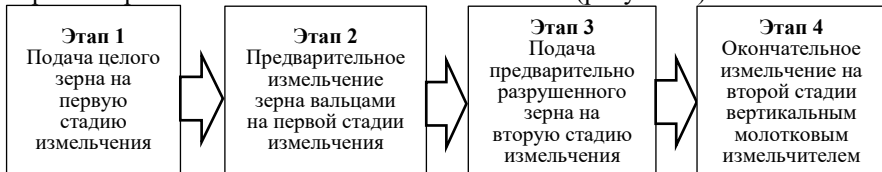


Рисунок 1. – Этапы воздействия на зерно при двухстадийном методе измельчения

На основании проведенного аналитического обзора были сформулированы цель и задачи исследования, представленные в общей характеристике работы.

Во второй главе дано теоретическое обоснование метода двухстадийного измельчения зернофуража с учетом физико-механических свойств зерна, и

установлены зависимости, позволяющие определить основные конструктивные и технологические характеристики работы оборудования.

На первой стадии двухстадийного измельчения осуществляется предварительное воздействие на зерно вальцами, что обеспечивает нарушение целостности зерна и образование в нем микротрещин, что снижает его прочность. При этом деформация зерна осуществляется со сдвигом и до величин, исключающей компрессионное сжатие.

Основным управляющим фактором является величина межвальцового зазора, которая определяет степень измельчения и удельные энергозатраты процесса, при этом работа вальцовых машин с малым межвальцовым зазором сопряжена с высокими удельными энергозатратами. Одна из причин данного явления – возникновение компрессионного сжатия зерна, то есть сжатие без возможности бокового расширения, приводящее к уплотнению зерна без его разрушения. Следовательно, для снижения удельных энергозатрат процесса измельчения на первой стадии необходимо исключить компрессионное сжатие вальцами.

Величина межвальцового зазора b , исключающего компрессионное сжатие на первой стадии измельчения, определяется по зависимости [10,13,15]:

$$b_{max} = d_n - \frac{h(l-p)}{l} - d_n \left(1 - \pi d_n^2 \left[6i \left(d_n \left(d_n + 2R_b - 2\sqrt{R_b^2 - \frac{d_n^2}{4}} \right) - 2R_b^2 \arccos \left(\frac{\sqrt{4R_b^2 - d_n^2}}{2R_b} \right) + R_b^2 \sin \left(2\arccos \left(\frac{\sqrt{4R_b^2 - d_n^2}}{2R_b} \right) \right) + \frac{h(l-p)d_n}{l} \right] \right)^{-1} \right), \quad (1)$$

где d_n – начальный размер сечения зерна, м; h – высота рифлей, м; l – шаг рифли вальцов, м; p – ширина полки рифлей, м; l_3 – длина зерна, м; i – соотношение скоростей вальцов; R_b , – радиус вальцов, м.

Разрушение зерна на первой стадии измельчения следует осуществлять со сдвигом, который обеспечивается различной частотой вращения вальцов. В результате уменьшается сила сжатия, необходимая для снижения прочности зерна и образования в нем микротрещин. При этом зерно не должно разделяться на части, так как на второй стадии большие частицы легче попадают под удар молотков и, обладая большей массой, интенсивнее разрушаются.

Соотношение скоростей вальцов, исключающее разделение зерна на части при первой стадии измельчения, определяем по зависимости [9;13;15]:

$$i = \frac{d_n}{R_b \arccos \left(1 - \frac{(d_n-b)}{2R_b} \right)} + 1. \quad (2)$$

Скорость деформации зерна на первой стадии измельчения определяем по зависимости [15]:

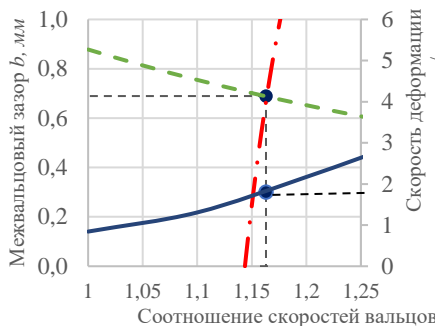
$$v_{деф} = \frac{v_{в.т} \cdot \left[\left(d_n - b - \frac{h(l-p)}{l} \right)^2 + \left(R_b \cdot \arccos \left(1 - \frac{(d_n-b)}{2R_b} \right) \cdot i - R_b \cdot \arccos \left(1 - \frac{(d_n-b)}{2R_b} \right) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{R_b \cdot \arccos \left(1 - \frac{(d_n-b)}{2R_b} \right)}, \quad (3)$$

где $v_{в.т}$ – окружная скорость тихоходного вальца, м/с.

Подставив числовые значения в зависимости (1)–(3), определим:

– теоретические значения межвальцового зазора на первой стадии измельчения, при которых будет исключаться компрессионное сжатие зерна: $b = 0,57$ мм для пшеницы; $b = 0,45$ мм для ржи; $b = 0,52$ мм для тритикале; $b = 0,69$ мм для ячменя; $b = 0,50$ мм для овса;

– теоретическое значение скорости деформации зерна вальцами ($v_{\text{деф}} = 1,7 \dots 1,8$ м/с), соотношение скоростей вальцов – в диапазоне $i = 1,14 \dots 1,16$.



--- межвальцовый зазор;
— скорость деформации;
- · - соотношение скоростей

Рисунок 2. – Графические зависимости межвальцового зазора и скорости деформации зерна от соотношения скоростей при измельчении ячменя

На вторую стадию зерно целесообразно подавать с начальной скоростью, что позволяет увеличить высоту пакета молотков, участвующую в измельчении зерна, следовательно, и количество зерна, одновременно подвергающегося ударам молотков, что способствует повышению производительности на второй стадии измельчения [13].

Получена аналитическая зависимость, на основании которой установлено значение скорости подачи зерна на вторую стадию, обеспечивающее задействование в измельчении пакета молотков необходимой высоты [13]:

$$v_{\text{пз}} = \frac{k_{\text{м}} v_{\text{м}} h_{\text{изм}}}{\pi D_{\text{р}}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{м}}$ – количество пакетов молотков, шт.; $v_{\text{м}}$ – скорость молотков до соударения с зерном, м/с; $h_{\text{изм}}$ – высота измельчения, м; $D_{\text{р}}$ – диаметр молоткового ротора, м.

На основании зависимости (4) определим, что при окружных скоростях молотков $v_{\text{м}} = 70 \dots 100$ м/с скорость подачи зерна $v_{\text{пз}} = 7,8 \dots 11,2$ м/с.

Получена аналитическая зависимость, на основании которой установлено значение количества загрузочных отверстий, позволяющих равномерно распределить подачу зерна на вторую стадию и не препятствовать измельченному зерну проходить путь от молотка к решету (деке) [13]:

$$n_{\text{от}} = \frac{2\pi}{\arccos\left(1 - \frac{2r_{\text{от}} + e_{\text{от}}}{R_{\text{из}}}\right) \cdot (1 + k_{\text{от}}) + \arctg\left(\frac{r_{\text{от}}}{R_{\text{из}} - (r_{\text{от}} + e_{\text{от}})}\right)}, \quad (5)$$

где $r_{\text{от}}$ – радиус загрузочного отверстия, м; $e_{\text{от}}$ – расстояние от края загрузочного отверстия до края камеры измельчения, м; $R_{\text{из}}$ – радиус камеры измельчения, м; $k_{\text{от}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий разброс зерна

после удара и зависящий от диаметра загрузочных отверстий (при диаметре отверстия 0,02...0,10 м $k_{от} = 0,2...0,4$ соответственно).

Для наиболее распространенных в Республике Беларусь молотковых измельчителей с вертикальной осью вращения количество загрузочных отверстий на второй стадии составляет 6 штук.

На второй стадии предварительно разрушенное зерно измельчается молотковым ротором с вертикальной осью вращения за счет ударов молотков и зерна о деку или сито.

Значение ударного импульса, проявляющегося при ударе молотка о зерно, зависит не только от массы зерна, скорости зерна и молотка до удара, но и от их упругих свойств. При ударе они характеризуются коэффициентом восстановления.

Получена зависимость для нахождения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии [15]:

$$k_{\varepsilon} = k - k \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

где k – коэффициент восстановления целого зерна (при влажности 13 % коэффициент восстановления целого зерна составляет: для пшеницы 0,50; ржи 0,47; тритикале 0,49; ячменя 0,53; для овса 0,43); ε – степень деформации зерна на первой стадии измельчения (находится в диапазоне от 0 до 1).

Применив теорему об изменении кинетической энергии системы, получим аналитические зависимости процесса разрушения зерна на второй стадии [13; 15]:

– для определения энергии (Дж), затраченной на пластическую деформацию зерна в результате удара молотка о зерно:

$$U_{\text{деф}} = \frac{m_3 v_c^2}{2} - \frac{m_3 (k_{\varepsilon} v_c)^2}{2}, \quad (7)$$

где m_3 – масса зерна перед измельчением, кг; v_c – скорость зерна после соприкосновения с молотком, м/с;

– для определения скорости (м/с) зерна после частичного восстановления его первоначальной формы и отрыва от молотка:

$$v_{\text{зр}} = v_c + k_{\varepsilon} v_c = v_c + (k - k \cdot \varepsilon) v_c; \quad (8)$$

– для определения энергии (Дж), образовавшейся вследствие удара о сито и идущей на деформацию зерна:

$$U_{\text{решзр}} = \frac{m_3 ((1 - k_{\varepsilon}) v_{\text{зр}} \cos \alpha_{\text{зр}})^2}{2}. \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{зр}}$ – угол падения зерна, при столкновении с ситом, рад.

При помощи зависимостей (7)–(9) установлено, что использование предварительного измельчения зерна на первой стадии перед молотковым измельчителем позволяет повысить долю кинетической энергии, идущей на пластическую деформацию зерна при ударе молотком, на 28,4 % для зерна пшеницы; на 24,2 % для зерна ржи; на 26,9 % для зерна тритикале; на 33,2 % для зерна ячменя; на 19,4 % для зерна овса, что повышает интенсивность измельчения на второй стадии.

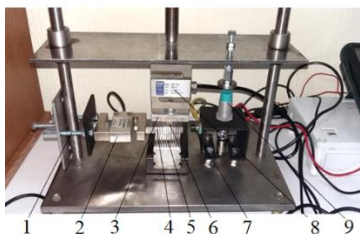
Получена аналитическая зависимость [13] для определения угла наклона передней грани рифли деки относительно радиальной линии $\gamma_{\text{риф}_1}$, что обеспечивает удар зерна о деку под прямым углом:

$$\gamma_{\text{риф}_1} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{\sqrt{(R_{\text{из}} - r_{\text{от}} - e_{\text{от}})^2 - \left(\frac{b_{\text{м}}}{2}\right)^2}}{R_{\text{из}}} \right), \quad (10)$$

где $b_{\text{м}}$ – ширина молотка, м.

Согласно зависимости (10) определен угол наклона передней грани рифли деки относительно радиальной линии ($\gamma_{\text{риф}_1} = 20^\circ \dots 30^\circ$) в зависимости от радиусов камеры измельчения и загрузочного отверстия для наиболее распространенных в Республике Беларусь молотковых измельчителей зерна.

В третьей главе приведены программа и методика экспериментальных исследований. Разработаны и изготовлены лабораторные установки для изучения деформации зерна при статическом и динамическом воздействии, а также исследования процесса сдвига (рисунок 4) на первой стадии измельчения.



1 – механизм натяжной; 2 – датчик тензометрический (фиксация силы сдвига); 3 – пластина верхняя; 4 – пластина нижняя; 5 – платформа гладкая; 6 – зерно; 7 – датчик линейного перемещения; 8 – датчик тензометрический (фиксация силы сжатия); 9 – датчик линейного перемещения (фиксация изменения линейного размера зерна)

Рисунок 4. – Лабораторная установка для изучения сдвига

Разработаны программы и методики, позволяющие исследовать процесс деформации зерна и установить элементы взаимосвязи между стадиями измельчения: зависимость коэффициента восстановления зерна от степени деформации на первой стадии; зависимость степени деформации зерна на второй стадии измельчения от окружной скорости молотков при различной степени деформации на первой стадии измельчения.

Разработаны методики оценки энергетических и функциональных показателей процесса двухстадийного измельчения зернофуража (удельные

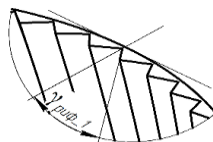


Рисунок 3. – Угол наклона передней грани рифли деки относительно радиальной линии

Обоснованы программы и методики исследований деформации зерна от оказываемых сил сжатия, сдвига и скорости воздействия на степень деформации и коэффициент восстановления.

Также разработаны и изготовлены лабораторные установки:

- для воссоздания условий воздействия на зерно на первой стадии измельчения [4; 7];

- изучения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии [15];

- изучения степени деформации зерна на второй стадии измельчения от окружной скорости молотков [11; 15].

энергозатраты, производительность, степень измельчения, однородность измельченного продукта, показатель качества) использованные при проведении многофакторного эксперимента.

Разработаны и изготовлены лабораторные установки (рисунок 5), а также разработаны программа и методика экспериментальных исследований метода двухстадийного измельчения зернофуража, позволяющие изучить влияние межвальцового зазора на первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решете на второй стадии измельчения на удельные энергозатраты, производительность, степень измельчения, средневзвешенный размер частиц, однородность измельченного продукта, показателя качества процесса при одностадийном измельчении зерна.

Экспериментальные исследования метода двухстадийного измельчения зернофуража включали в себя предварительное измельчение зерна в вальцовом измельчителе (рисунок 5 а) и окончательное доизмельчение зерна в молотковом измельчителе (рисунок 5 б).



а



б

Рисунок 5. – Лабораторная установка (общий вид) для исследования первой стадии (а) и второй стадии (б) измельчения

В четвертой главе приведены результаты экспериментальной проверки теоретических зависимостей по определению основных технологических параметров процесса измельчения зерна:

- межвальцового зазора, исключающего компрессионное сжатие. Было выявлено, что относительная погрешность теоретических значений по сравнению с экспериментальными находится в диапазоне от 5,5 % до 12,2 %, в зависимости от вида злаковой культуры (рисунок 6) [7];

- соотношение скоростей вальцов, исключающее разделение зерна на части при первой

Для измерения и регистрации параметров рабочего процесса измельчения использовалась серийная измерительная аппаратура. Исследования проводились согласно ТНПА по испытанию сельскохозяйственной техники. Обработка результатов эксперимента проводилась методами математической статистики.

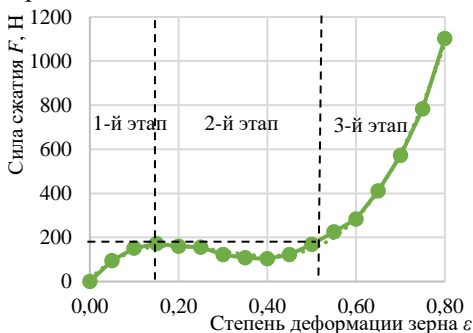


Рисунок 6. – График экспериментальной зависимости деформации зерна ячменя

стадии измельчения. Было выявлено, что относительная погрешность теоретических значений по сравнению с экспериментальными составляет 1 % [9]; – коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии с учетом степени деформации. Было выявлено, что относительная погрешность теоретических значений по сравнению с экспериментальными составляет 2 % [15].

Для экспериментального исследования метода двухстадийного измельчения зернофуража и оптимизации конструктивных параметров оборудования был проведен многофакторный эксперимент по определению влияния межвальцового зазора на первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решетке на второй стадии измельчения на удельные энергозатраты q , кВт·ч/т; производительность Q , т/ч; степень измельчения $\lambda_{\text{изм}}$; средневзвешенный размер частиц L_s , мм; однородность измельченного продукта (коэффициент вариации) V , %; показатель качества измельченного зерна K [13; 15]. Уровни и значения факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Значение факторов X_1 и X_2 в кодированном и натуральном виде

Факторы	Обозначение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Межвальцовый зазор, мм	X_1	1,0	0,5	1,5	2,5
Диаметр отверстий в решетке, мм	X_2	1	3,0	4,5	6,0

$X_1 = (b - 1,5)/1$; $X_2 = (d - 4,5)/1,5$ где X_1 – межвальцовый зазор в кодированном виде (от -1 до 1); X_2 – диаметр отверстий в решетке в кодированном виде (от -1 до 1); b – межвальцовый зазор в натуральном виде, мм; d – диаметр отверстий в решетке в натуральном виде, мм.

Обработка экспериментальных данных позволила получить адекватные регрессионные модели, описывающие модель усовершенствованного процесса двухстадийного измельчения зерна и устанавливающие влияние межвальцового зазора первой стадии измельчения и диаметра отверстий в решетке второй стадии измельчения: на удельные энергозатраты $y_1 = 5,99 + 0,45X_1 - 1,57X_2 - 0,40X_1X_2 + 1,10X_1^2 + 0,37X_2^2$; производительность $y_2 = 0,56 - 0,16X_1 + 0,06X_2 - 0,02X_1X_2 - 0,09X_1^2$; степень измельчения $y_3 = 2,17 - 0,25X_1 - 0,28X_2$; средневзвешенный размер частиц $y_4 = 1,53 + 0,17X_1 + 0,21X_2 + 0,05X_1X_2 + 0,05X_2^2$; однородность измельченного продукта $y_5 = 5,84 - 1,09X_1 - 1,39X_2$; показатель качества измельченного зерна для требуемой фракции 0...2 мм $y_{10} = 77,68 - 9,54X_1 - 11,83X_2 - 2,60X_1X_2 + 3,06X_1^2 - 2,72X_2^2$; 0...3 мм $y_{11} = 99,50 - 0,30X_2 + 0,32X_1^2$ [15].

Применение полученных уравнений позволило провести многокритериальную оптимизацию метода двухстадийного измельчения зернофуража. Для этого воспользовались методом математического программирования, заключающимся в решении задачи минимизации целевой функции при заданном ограничении, провели расчет при помощи компьютерной программы MS Excel, применив встроенную надстройку «Поиск решения».

В качестве целевой функции задано снижение удельных энергозатрат (рисунок 7 а) и ограничивающей функции (показатель качества не менее 95 %) при размере требуемой фракции 0...2 мм (рисунок 7 б). При этом будет обеспечено производство корма для свиней в соответствии СТБ 2111–2010 и КРС при откорме на животноводческих комплексах в соответствии с ГОСТ 18221–2018.

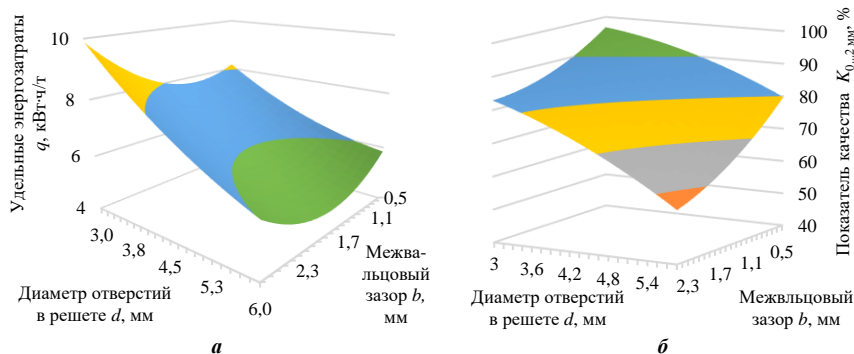


Рисунок 7. – Диаграммы удельных энергозатрат (а), показателя качества (б) измельчения зерна двухстадийным методом для откорма животных с требуемой фракцией 0...2 мм от межвальцового зазора и диаметра отверстий в решетке

В результате решения получили, что для обеспечения содержания не менее 95 % размера требуемой фракции в диапазоне 0...2 мм необходимо установить валцы на первой стадии измельчения с зазором $b = 0,50$ мм ($X_1 = -1$), диаметр отверстия в решетке на второй стадии измельчения $d = 4,01$ мм ($X_2 = -0,27$). При применении двухстадийного метода вместо одностадийного молоткового при производстве кормов с размером требуемой фракции в диапазоне 0...2 мм наблюдается снижение удельных энергозатрат на 30 % (с 10,1 до 7,1 кВт·ч/т); увеличение показателя качества на 27 % (с 68 % до 95 %); увеличение производительности на 135 % (с 0,26 до 0,61 т/ч); повышение степени измельчения на 25 % (с 2,00 до 2,49); уменьшение средневзвешенного размера частиц на 19 % (с 1,62 до 1,32 мм), что свидетельствует о синергетическом эффекте и указывает на эффективность применения метода двухстадийного измельчения зернофуража вместо одностадийного [15].

Для получения размера требуемой фракции 0...3 мм (y_7), при ее содержании 95 %, обеспечивая производство корма для свиней в соответствии с ГОСТ 13299–71; ГОСТ 9267–68; ГОСТ 16955–2015; ГОСТ 21055–2019, КРС при откорме в хозяйствах в соответствии с СТБ 1842–2008, ГОСТ 18221–2018 и молодняка сельскохозяйственной птицы, включая цыплят-бройлеров в соответствии с СТБ 1842–2008, необходимо установить межвальцовый зазор на первой стадии измельчения $b = 1,50$ мм ($X_1 = 0$), диаметр отверстия в решетке на второй стадии измельчения в размере $d = 6,00$ мм ($X_2 = 1$). При применении

двухстадийного метода вместо одностадийного молоткового при производстве кормов с размером требуемой фракции в диапазоне 0...3 мм наблюдается снижение удельных энергозатрат на 46 % (с 8,90 до 4,79 кВт·ч/т); увеличение показателя качества на 3 % (с 96 % до 99 %); увеличение производительности на 121 % (с 0,28 до 0,62 т/ч); снижение степени измельчения на 8 % (с 2,03 до 1,83); увеличение средневзвешенного размера частиц на 12 % (с 1,60 до 1,79 мм) [15].

Применяя полученные уравнения, можно получить требуемое качество корма для различных видов животных, при этом в качестве целевой функции можно использовать различные функциональные показатели: удельные энергозатраты, производительность, однородность измельчения.

Совокупностью теоретических и экспериментальных исследований обоснован метод двухстадийного измельчения зернофуража.

В пятой главе для реализации предложенного метода двухстадийного измельчения зернофуража разработана методика инженерного расчета конструктивных параметров и технологических режимов работы оборудования для двухстадийного измельчения зернофуража [14].

С использованием разработанной методики выполнены предпроектные расчеты конструктивных параметров вальцовой дробилки зерна ДВ-3, опытный образец которой изготовлен Щучинским РМЗ и прошел приемочные испытания в ГУ «Белорусская МИС» (протокол № 042 Б 1/4-2016ИЦ) [6; 10].

Опытный образец оборудования для реализации метода двухстадийного измельчения зернофуража был установлен в комбикормовом цеху МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи» (рисунок 9 а, б).

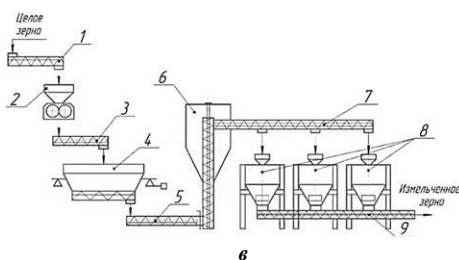
Для осуществления производственной проверки усовершенствованного процесса двухстадийного измельчения зернофуража на МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи» внедрена технологическая схема двухстадийного измельчения зернофуража (рисунок 9 в) [8; 14; 15].



а



б



в

а – измельчитель вальцовый ДВ-3 (первая стадия измельчения); *б* – измельчитель молотковый ДЗВ-5 (вторая стадия измельчения); *в* – схема технологическая усовершенствованного процесса двухстадийного измельчения зернофуража, внедренная на МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи»: 1 – конвейер, подающий зерно; 2 – измельчитель вальцовый ДВ-3; 3 – конвейер разгрузки вальцового измельчителя ДВ-3; 4 – бункер весовой; 5 – конвейер разгрузки бункера весового; 6 – бункер накопительный; 7 – конвейер, подающий зерно; 8 – измельчители молотковые ДЗВ-5; 9 – конвейер разгрузки молотковых измельчителей ДЗВ-5

Рисунок 9. – Производственная проверка технологии и оборудования для двухстадийного измельчения зерна

В результате сопоставления функциональных показателей работы одностадийного молоткового и двухстадийного измельчения зерна, по результатам производственной проверки, в соответствии с ТКП 281–2010, было установлено снижение удельных энергозатрат на 44,7 % (с 10,5 до 5,8 кВт·ч/т) [8; 12; 15; 16].

Годовой экономический эффект от внедрения технологии двухстадийного измельчения зерна составил более 10,5 тыс. рублей, срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 1,34 года, удельный экономический эффект – 0,52 рубля на тонну переработанного зерна [8; 12; 15; 16].

Техническая новизна метода двухстадийного измельчения зернофуража и разработанного на его основе усовершенствованного процесса подтверждается патентом на изобретение Республики Беларусь на способ и устройство № 23315 [15; 47].

Результаты исследований были внедрены на МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи»; РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; в образовательный процесс учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основании аналитического обзора установлено, что в себестоимости животноводческой продукции корма составляют 51 %...68 %. При этом наибольшей стоимостью обладают концентрированные корма, которые в балансе кормов птицеводства составляют 93 %, в свиноводстве – 90 %, при выращивании КРС в летний период – 15 %...20 % и в зимний период – 40 %...50 %. Зернофураж в рецептуре комбикорма по количественному признаку является основным компонентом, его измельчение – ключевым технологическим этапом, удельные энергозатраты которого доходят до 70 % от энергозатрат всей технологии производства комбикорма. Установлено, что проблема высоких удельных энергозатрат может быть решена путем применения новых методов измельчения. Один из наиболее эффективных – двухстадийное измельчение зерна при последовательном совмещении статического (давление) в вальцовом измельчителе и динамического (удар) в молотковом измельчителе видов деформации зерна [1; 15].

2. В результате проведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости, описывающие метод двухстадийного измельчения зернофуража, учитывающие физико-механические свойства зерна, позволяющие получить расчетные значения конструктивных и технологических характеристик оборудования [9; 10; 13; 15]:

– межвальцового зазора b , исключаяющего компрессионное сжатие зерен злаковых культур ($b = 0,45...0,69$ мм);

– соотношения окружных скоростей валцов i , исключающие разделение зерна на части на первой стадии измельчения (передаточное отношение $i = 1,14 \dots 1,16$);

– скорости деформации зерна $v_{\text{деф}}$ на первой стадии обработки ($v_{\text{деф}} = 1,7 \dots 1,8$ м/с);

– скорости подачи зерна на вторую стадию $v_{\text{пз}}$, при которой будет задействован необходимый профиль пакета молотков в зависимости от изменения окружной скорости ($v_{\text{пз}} = 7,8 \dots 12,2$ м/с);

– коэффициента восстановления зерен злаковых культур после предварительной деформации на первой стадии. На основании аналитической зависимости которого установлено снижение коэффициента восстановления при применении предварительного измельчения с 0,50 до 0,16;

– баланса и количества энергии, затраченной при ударе, пластической деформации, отрыве от молотка. На основании аналитических зависимостей установлена доля дополнительной энергии приходящаяся на пластическую деформацию зерна при ударе 19 %...33 %;

– угла наклона передней грани рифли деки $\gamma_{\text{риф}_1}$ относительно радиальной плоскости ($\gamma_{\text{риф}_1} = 20^\circ \dots 30^\circ$) и количества загрузочных отверстий для равномерной подачи зерна ($n = 6$ шт.).

3. Выполнен многофакторный эксперимент, в результате которого получены уравнения регрессии, описывающие модель усовершенствованного процесса двухстадийного измельчения зерна. На основании полученной регрессионной модели, средствами многокритериальной оптимизации установлены рациональные параметры межвалцового зазора b и диаметра отверстий d в решетке для достижения необходимой степени измельчения, средневзвешенного размера частиц, однородности продукта, показателя качества в зависимости от требуемой фракции 0...2 мм или 0...3 мм соответственно: $b = 0,5$ и 1,5 мм; $d = 4$ и 6 мм, при которых достигается снижение удельных энергозатрат на 30 % и 46 %, увеличение производительности на 121 % и 135 % и достижение показателя качества до 95 % и 99 %, за счет синергетического эффекта, возникающего при последовательном совмещении статического и динамического видов деформации зерна, что указывает на эффективность применения двухстадийного метода для измельчения зернофуража при производстве комбикормов для откорма свиней, КРС, перепелов, молодняка сельскохозяйственной птицы, включая цыплят-бройлеров [2; 3; 5; 12; 15].

4. Совокупностью теоретических и экспериментальных исследований обоснован метод двухстадийного измельчения зернофуража, и на его основе разработан усовершенствованный процесс, в котором: на первой стадии осуществляется деформация зерна со сдвигом, так как вращаются валцы с разными окружными скоростями, исключая компрессионное сжатие зерна; на второй стадии происходит измельчение зерен молотковым измельчителем с вертикальной осью вращения [2; 3; 7; 9; 10; 11; 12; 13; 15]. Новизна

разработанных технических решений подтверждается патентом на изобретение Республики Беларусь на способ и устройство № 23315 [15].

5. Разработана методика инженерного расчета основных конструктивных параметров и технологических режимов работы машин для двухстадийного измельчения зернофуража: межвальцового зазора, длины вальцов, соотношения скоростей вальцов, диаметра отверстий в решетке, диаметра молоткового ротора, высоты пакета молотков, окружной скорости на концах молотков, мощности привода первой и второй стадии, в зависимости от требуемой производительности и показателя качества измельчения, которая позволяет также определить функциональные показатели процесса измельчения для разных видов зерна (пшеница, рожь, тритикале, ячмень, овес): удельные энергозатраты, степень измельчения, средневзвешенный размер частиц, однородность измельчения [14].

6. Производственная проверка усовершенствованного процесса двухстадийного измельчения зернофуража вальцовым и вертикальным молотковым измельчителем установила расчетное снижение удельных затрат на 0,52 рубля на тонну переработанного зерна [6; 8; 12; 15].

Практическая реализация результатов научных исследований

Результаты исследований по обоснованию параметров и режимов работы первой и второй стадии измельчения использованы РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» при выполнении НИОКР Ж 2.5.6 и НИР 4.81, соответственно, при разработке вальцового измельчителя зерна ДВ-3, опытный образец которого прошел приемочные испытания в ГУ «Белорусская МИС» протокол № 042 Б 1/4-2016ИЦ и применен при модернизации комбикормового цеха на МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи» на первой стадии измельчения.

Применение метода двухстадийного измельчения зернофуража при модернизации комбикормового цеха на МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи» с использованием машины ДВ-3 обеспечило расчетный экономический эффект более 10,5 тыс. белорусских рублей в год на один агрегат. Объем измельченного зерна различных культур составляет около 1670 т за месяц. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений – 1,34 года на один агрегат.

Лабораторные установки для изучения деформации зерна при статическом и динамическом воздействии внедрены в образовательный процесс БГАТУ на кафедре стандартизации и метрологии при преподавании дисциплины «Средства измерений физических величин».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Дашков, В. Н. Совершенствование технических средств для измельчения фуражного зерна / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Агропанорама. – 2013. – № 5. – С. 23–28.
2. Дашков, В. Н. Методика обоснования параметров двухстадийного измельчителя зерна / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Вестник БГСХА. – 2014. – № 2. – С. 190–193.
3. Экспериментальные исследования двухстадийного измельчения фуражного зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд, А. И. Пунько, М. В. Иванов // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2014. – Вып. 48. – Т. 2. – С. 84–93.
4. Методика калибровки тензодатчика при исследовании влияния межвальцового зазора на распорное усилие между вальцами площилки / А. В. Ващула, Н. А. Воробьев, А. В. Захаров, В. Н. Савиных, С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2014. – Вып. 48. – Т. 2. – С. 93–99.
5. Экспериментальное исследование двухроторного измельчителя / А. И. Пунько, М. В. Иванов, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 32–36.
6. Экспериментальное исследование вальцовой дробилки зернофуража ДВ-3 / А. И. Пунько, М. В. Иванов, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 27–31.
7. Дрозд, С. А. Исследование разрушения зерна при статическом сжатии / С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 36–40.
8. Дрозд, С. А. Применение ресурсосберегающей технологии двухстадийного измельчения зернофуража в условиях реального производства / С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2017. – Вып. 51. – С. 181–186.
9. Дрозд, С. А. Экспериментально-теоретическое обоснование передаточного отношения между вальцами при двухстадийном измельчении зернофуража / С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского

хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2017. – Вып. 51. – С. 186–194.

10. Воробьев, Н. А. Теоретическое обоснование межвальцового зазора и соотношения скоростей валцов при двухстадийном измельчении зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Агропанорама. – 2019. – № 4. – С. 13–16.

11. Воробьев, Н. А. Экспериментальное исследование разрушения зерна при динамическом воздействии / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 53. – С. 149–153.

12. Воробьев, Н. А. Экспериментальное исследование способа двухстадийного измельчения зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 53. – С. 188–191.

13. Воробьев, Н. А. Теоретическое обоснование вальцовых и молотковых рабочих органов при двухстадийном измельчении зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2020. – Вып. 53. – С. 192–197.

14. Воробьев, Н. А. Методика инженерного расчета параметров и режимов работы оборудования для двухстадийного измельчения зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Агропанорама. – 2020. – № 5. – С. 15–19.

15. Дрозд, С. А. Обоснование параметров и режимов работы вальцового и вертикального молоткового измельчителя при двухстадийном способе измельчения зерна / С. А. Дрозд // Агропанорама. – 2022. – № 2. – С. 3–9.

Статья в зарубежных изданиях:

16. Воробьев, Н. А. Экспериментальные исследования процесса двухстадийного измельчения зерна и оценка его энергоэффективности / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд, А. И. Пунько // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – СПб., 2017. – Вып. 92. – С. 67–75.

Тезисы докладов, материалы международных конференций:

17. Дашков, В. Н. Анализ энерго- и ресурсоемкости оборудования для измельчения зерна / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Инновация технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2011. – № 1. – С. 73–77.

18. Снижение энергопотребления деструкции зерна / В. Романюк, В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Проблемы интенсификации

животноводства с учетом пространственной структуры семейных хозяйств, охраны окружающей среды и стандартов ЕС : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Варшава : ИТП, 2011. – С. 151–154.

19. Дашков, В. Н. Преимущества двухстадийного измельчения фуражного зерна / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 189–194.

20. Дрозд, С. А. Выбор показателей для измельчения зерна / С. А. Дрозд, В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев // НИРС-2011. – Минск : БГУ, 2011. – С. 268.

21. Дашков, В. Н. Обоснование процесса двухстадийного измельчения зерна / В. Н. Дашков, С. А. Дрозд // Агропромышленный комплекс: контуры будущего : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Курск : КСХА, 2012. – № 3. – С. 112–116.

22. Дрозд, С. А. Обоснование процесса двухстадийного измельчения зерна / С. А. Дрозд, В. Н. Дашков // Научно-практические аспекты технологий возделывания и переработки масленичных культур : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Рязань : РГАТУ, 2013. – С. 111–115.

23. Дрозд, С. А. К вопросу о двухстадийном измельчении зерна / С. А. Дрозд, В. Н. Дашков // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2013. – С. 52–55.

24. Дрозд, С. А. Методика экспериментальных исследований двухстадийного измельчения зерна / С. А. Дрозд, В. Н. Дашков // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2013. – С. 55–57.

25. Дашков, В. Н. Исследование влияние нарезки вальцового измельчителя на гранулометрический состав односортового помола ржи в обдирную муку / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Перспективные технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2013. – С. 243–246.

26. Дашков, В. Н. Исследование качества односортового помола ржи в обдирную муку при различной нарезке вальцов вальцового измельчителя / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Современный рынок товаров и проблемы здорового питания : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Харьков : ХДУХТ, 2013. – С. 156–157.

27. Дашков В. Н. Экспериментальное исследование процесса двухстадийного измельчения зерна / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2013. – С. 195–198.

28. Дрозд, С. А. Повышение эффективности процесса двухстадийного измельчения зерна / С. А. Дрозд, Н. А. Воробьев // НИРС-2013. – Минск : БГУ, 2014. – С. 232.

29. Воробьев, Н. А. Исследование энергоемкости и модуля помола при одно- и двухстадийном измельчении зерна ячменя / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд, В. Н. Савиных // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2014. – С. 300–302.

30. Исследование величины распорного усилия между вальцами плющилки в зависимости от межвальцового зазора и окружной скорости вальцов при разной влажности зерна ржи / Н. А. Воробьев, В. Н. Савиных, С. А. Дрозд // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2014. – С. 302–304.

31. Анализ исследований в области двухстадийного измельчения зернофуража / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 65–68.

32. Результаты производственных испытаний вальцового измельчителя на зерне озимой ржи / И. Н. Шило, Н. А. Воробьев, В. Н. Савиных, А. В. Гуд, С. А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 143–146.

33. К вопросу об исследовании разрушения зерна при динамическом и статическом сжатии / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд, Л. Г. Ванькович, Т. В. Паромчик // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 153–156.

34. Воробьев, Н. А. Теоретическое исследование скорости деформации зерновки вальцами / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Перспективная техника и технологии в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2016. – С. 51–53.

35. Воробьев, Н. А. Разработка стенда для исследования разрушения зерна при статическом сжатии / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Перспективная техника и технологии в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2016. – С. 53–55.

36. Воробьев, Н. А. Теоретическое исследование передаточного отношения между вальцами при двухстадийном измельчении зернофуража / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Инновационная деятельность в модернизации АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2016. – С. 215–219.

37. К вопросу калибровки тензометрических датчиков / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд, А. В. Кудина, Н. А. Мурашко // Инновационная деятельность в модернизации АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2016. – С. 229–222.

38. Воробьев, Н. А. Производственные исследования двухстадийного измельчения зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных

ресурсосберегающих технологий в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Рязань : ФГБОУВО «РГАТУ», 2017. – С. 84–87.

39. Воробьев, Н. А. Исследование качественных показателей измельчения зернофуража двухстадийным способом / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2017. – С. 241–244.

40. Дрозд, С. А. Экспериментальное исследование влияния соотношения скоростей валцов в валцовом измельчителе на разрушение зерна / С. А. Дрозд, В.С. Стрельченко, Е.А. Минков // Перспективы и тенденции развития технического сервиса сельскохозяйственных машин: материалы IV Всеукраинской науч.-практ. конф. междунар. науч.-практ. конф. – Житомир, 2018. – С. 289–290.

41. Дрозд, С.А. К вопросу повышения точности результатов измерений / С. А. Дрозд, Т. М. Булойчик, Ю. С. Позняк // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2019. – С. 263–265.

42. Воробьев, Н. А. Исследования влияния нарезки валцов валцового измельчителя на качество измельчения / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2019. – С. 266–267.

43. Воробьев, Н. А. Анализ зоотехнических требований к качеству измельчения зерна на кормовые цели / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2019. – С. 267–268.

44. Воробьев, Н. А. Экспериментальное исследование разрушения зерна при статическом сжатии // Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Импортзамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – С. 45–49.

45. Воробьев, Н. А. Способ и устройство для двухстадийного измельчения зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. «Белагро–2019». – Минск : БГАТУ, 2019. – С. 254–260.

46. Воробьев, Н. А. Экспериментальные исследования разрушения зерна при динамическом воздействии / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2019. – Ч. 2 – С. 141–143.

47. Воробьев, Н. А. Исследование способа двухстадийного измельчения зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2019. – Ч. 2 – С. 144–146.

48. Воробьев, Н. А. Производственная проверка и экономическая оценка способа двухстадийного измельчения зерна / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2019. – Ч. 2 – С. 153-155.

49. Воробьев, Н. А. Управление качеством измельчения зерна при двухстадийном способе / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Минск : БГАТУ, 2021. – С. 112–114.

Патент на полезную модель:

50. Молотковая дробилка: полез. модель ВУ 9403 / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд. – Опубл. 30.08.2013.

Патент на изобретения:

51. Устройство для одновременного измельчения нескольких видов зерна и способ одновременного измельчения нескольких видов зерна: пат. ВУ 23315 / И. Н. Шило, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд. – Опубл. 28.02.2021.

РЕЗЮМЕ

Дрозд Сергей Александрович

СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ ДВУХСТАДИЙНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ ЗЕРНОФУРАЖА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМБИКОРМОВ

Ключевые слова: сельское хозяйство, производство комбикормов, двухстадийное измельчение зернофуража, прочность зерна, теория измельчения, статическое разрушение, динамическое разрушение, обоснование параметров, режимы работы.

Цель работы: снижение удельных энергозатрат при производстве комбикормов путем применения метода двухстадийного измельчения зернофуража с обоснованием параметров и режимов работы вальцового и вертикального молоткового измельчителя.

Методы исследования и аппаратура. Теоретические исследования проводились на основе методов математического анализа и законов механики, экспериментальные – по методикам, разработанным на основе общепринятых методик. Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленных экспериментальных установках.

Полученные результаты и их новизна. Разработан метод двухстадийного измельчения зернофуража и усовершенствованный процесс, основанный на этом методе, получены новые аналитические зависимости, позволяющие описать процесс двухстадийного измельчения с учетом технологических параметров и обосновать рациональные параметры работы оборудования, что позволило снизить удельные энергозатраты процесса измельчения на 30 %...46 % при получении требуемой фракции содержанием не менее 95 %; разработана методика инженерного расчета, позволяющая выбрать необходимый показатель качества измельчения, задать производительность процесса двухстадийного измельчения зерна с использованием вальцового и вертикального молоткового измельчителя.

Новизна разработанных технических решений подтверждается патентом на изобретение Республики Беларусь на способ и устройство № 23315.

Рекомендации по использованию. Результаты исследования внедрены на МРУП «Агрокомбинат «Ждановичи»; РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; в образовательный процесс учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет».

Область применения. Организации и предприятия Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь.

РЭЗІЮМЭ

Дрозд Сяргей Аляксандравіч

ЗНІЖЭННЕ ЁДЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГАЗАТРАТ ДВУХСТАДЫЙНЫМ ДРАБНЕННЕМ ЗЕРНЕФУРАЖУ ПРЫ ВЫТВОРЧАСЦІ КАМБІКАРМОЎ

Ключавыя словы: сельская гаспадарка, вытворчасць камбікармоў, двухстадыйнае драбненне зерня, трываласць зернефуражу, тэорыя драбнення, статычнае разбурэнне, дынамічнае разбурэнне, абгрунтаванне параметраў, рэжымы работы.

Мэта работы: зніжэнне ўдзельных энергазатрат пры вытворчасці камбікармоў шляхам прымянення метада двухстадыйнага драбнення зернефуражу з абгрунтаваннем параметраў і рэжымаў работы вальцовага і вертыкальнага малатковага здрабняльніка.

Метад даследавання і апаратура. Тэарэтычныя даследаванні праводзіліся на аснове метадаў матэматычнага аналізу і законаў механікі, эксперыментальныя – па метадыках, распрацаваных на аснове агульнапрынятых метадык. Эксперыментальныя даследаванні праводзіліся на спецыяльна вырабленых эксперыментальных устаноўках.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны метады двухстадыйнага драбнення зернефуражу і ўдасканалены працэс, заснаваны на гэтым метады, атрыманы новыя аналітычныя залежнасці, якія дазваляюць апісаць працэс двухстадыйнага драбнення з улікам тэхналагічных параметраў і абгрунтаваць рацыянальныя параметры работы абсталявання, што дазволіла знізіць удзельныя энергазатраты працэса драбнення на 30 %...46 % пры атрыманні патрабаванай фракцыі зместам не менш за 95%; распрацавана метадыка інжынернага разліку, якая дазваляе абраць неабходны паказчык якасці драбнення, задаць прадукцыйнасць працэса двухстадыйнага драбнення збожжа з выкарыстаннем вальцовага і вертыкальнага малатковага здрабняльніка.

Навізна распрацаваных тэхнічных рашэнняў пацвярджаецца патэнтам на вынаходства Рэспублікі Беларусь на спосаб і ўстройства № 23315.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследавання ўкаранёны на МРУП «Агракамбінат «Ждановічы»; РУП «НПЦ НАН Беларусі па механізацыі сельскай гаспадаркі»; у адукацыйнай працэсе установы адукацыі «Беларускі дзяржаўны аграрны тэхнічны ўніверсітэт».

Вобласць ужывання. Арганізацыі і прадпрыемствы Міністэрства сельскай гаспадаркі і харчавання Рэспублікі Беларусь

SUMMARY

Drozd Siarhei Alexandrovich

REDUCING SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION BY TWO-STAGE GRINDING OF GRAIN FODDER IN THE PRODUCTION OF COMPOUND FEED

Keywords: agriculture, feed production, two-stage grinding of grain fodder, grain strength, grinding theory, static destruction, dynamic destruction, justification of parameters, operating modes.

The purpose of the work is reduction of specific energy consumption in the production of mixed feed by using the method of two-stage grinding of grain fodder with justification of the parameters and operating modes of a roller and vertical hammer grinder.

Method of research and equipment. Theoretical studies were carried out on the basis of methods of mathematical analysis and the laws of mechanics, experimental studies were carried out using methods developed on the basis of generally accepted methods. Experimental studies were carried out on specially manufactured experimental installations.

Results and their novelty. A method of two-stage grinding of grain fodder and an improved process based on this method have been developed and new analytical dependencies have been obtained that make it possible to describe the process of two-stage grinding taking into account technological parameters and justify the rational parameters of equipment operation, which has reduced the specific energy consumption of the grinding process by 30 %...46 % upon receipt of the required fraction containing at least 95%; an engineering calculation methodology has been developed that allows you to choose the necessary indicator of the quality of grinding, to set the productivity of the two-stage grain grinding process using a roller and vertical hammer grinder.

The novelty of the developed technical solutions is confirmed by the patent for the invention of the Republic of Belarus for the method and device No. 23315.

Recommendations for usage. The results of the research are implemented in the MRUE «Agrokombinat «Zhdanovichi»; the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization; Belarusian State Agrarian Technical University.

Scope. Organizations and enterprises of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus.



Научное издание

ДРОЗД Сергей Александрович

**СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ
ДВУХСТАДИЙНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ ЗЕРНОФУРАЖА
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМБИКОРМОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства
(технические науки)

Ответственный за выпуск С. А. Дрозд
Компьютерная верстка С. А. Дрозд

Подписано в печать 24.10.2023. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография + XEROX 700 DCP.
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 60 экз. Заказ 598.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–1, 220012, Минск.