

На правах рукописи



ЧЕРЕПКОВ Александр Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА
С ОБОСНОВАНИЕМ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орёл – 2016

Работа выполнена на кафедре Механизации технологических процессов в АПК федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный аграрный университет»

- Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Коношин Иван Вячеславович
- Официальные оппоненты: **Панин Иван Григорьевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ООО «Авита», генеральный директор;
Яровой Михаил Николаевич, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», заведующий кафедрой механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции
- Ведущая организация ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности»

Защита состоится 23 июня 2016 г. в 14 часов 00 минут заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ») по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ» 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=3131>.

Автореферат разослан 21 апреля 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По данным ФАО, к 2050 году население планеты составит 9 млрд. человек, а потребность в еде увеличится на 60 % по сравнению с сегодняшним днем. Объем мирового производства мяса и рыбы увеличится в 2 раза. В связи с этим, по оценке экспертов, к 2020 году объем рынка комбикормов в России в натуральном выражении вырастет на 9 млн. тонн, в стоимостном - на 280 млрд. руб. и составит 40 млн. тонн.

Потребность населения России в мясных продуктах за счет собственного производства обеспечивается только на 78,4 %, страна продолжает оставаться крупнейшим импортером мяса и мясной продукции. Удельный вес России в мировом производстве мяса составляет около 2 %. В то же время доля концентратов в общем кормовом балансе России составляет 29-32 %, а затраты на кормление в структуре себестоимости продукции, по мнению экономистов, занимают 60...75%.

Поэтому одной из главных задач государственной программы развития сельского хозяйства на 2013-2020 годы является обеспечение продовольственной независимости страны в параметрах, заданных Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации. В связи с этим планируется увеличить индекс производства продукции сельского хозяйства в хозяйствах всех категорий в 2020 г. к 2010 г. – на 142,8 %, в том числе продукции растениеводства – на 165,6%, продукции животноводства – на 124,5 %.

В настоящий момент основным оборудованием для измельчения зерна являются молотковые дробилки. Поэтому увеличение объемов производства продукции животноводства невозможно без совершенствования конструктивных и режимных параметров этих измельчающих машин. В связи с этим, актуальность исследований заключается в совершенствовании процесса измельчения фуражного зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

Степень разработанности темы. Проблемами совершенствования процесса измельчения зерна занимались российские и зарубежные ученые. Среди них следует отметить труды Н. Е. Авдеева, В. Р. Алешкина, С. В. Денисова, А. Р. Демидова, Н. С. Дорофеева, С. В. Золотарева, С. В. Мельникова, В. А. Елисеева, П. А. Савиных, В. В. Спорыхина, В. В. Труфанова, А. А. Сундеева, И. В. Коношина, Н. Ф. Баранова; W. Kruger, E. Silver, A. Hendrix, Ф. Кик и др. Однако данных исследований недостаточно.

При анализе существующих моделей молотковых дробилок, а также теоретической базы на основе литературных источников было выявлено, что проблемы, присущие молотковым дробилкам, а именно: повышенное содержания пылевидной фракции в получаемом продукте, неравномерность гранулометрического состава, высокая энергоемкость процесса, требуют дальнейшего развития и решения.

Целью исследований данной работы является повышение эффективности процесса измельчения зерна за счет совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

Задачи исследования:

Предложить новые конструктивно-технические элементы молотковой дробилки;

- получить аналитические зависимости влияния прямоугольной и круглой форм отверстий решета на качественные и энергетические показатели получаемого продукта;

- на основании экспериментальных данных получить зависимости влияния конструктивно-режимных параметров на качественные и энергетические показатели получаемого продукта;

- оптимизировать работу молотковой дробилки с целью получения продукта заданного качества с минимальной удельной энергоемкостью;

- рассчитать экономическую эффективность использования предложенного решения.

Объектом исследования является технологический процесс измельчения зерна в молотковой дробилке, а также ее основные конструктивные элементы.

Предметом исследования являются закономерности влияния основных конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки на эффективность процесса измельчения зерна.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

- новое техническое решение конструкции молотковой дробилки (патент на изобретение № 2520653 РФ);

- аналитические зависимости влияния прямоугольной и круглой форм отверстий решета на приращение поверхности получаемого продукта, содержание пылевидной фракции и недоизмельченных частиц, энергоемкость измельчения и пневмотранспортирования;

- уравнения регрессии влияния конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки с регулятором «живого» сечения на технологический процесс и качественные показатели полученного продукта;

- рациональные конструктивно-режимные параметры работы молотковой дробилки, полученные для корма с заданными параметрами (модулем помола, содержанием пылевидной фракции и остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм) и имеющим минимальную удельную энергоемкость.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что теоретически и экспериментально обосновано использование регулятора «живого» сечения, выполненного в виде решет с отверстиями прямоугольной формы, а также использование отдельного частотно-регулируемого привода вентилятора и ротора дробилки. Это позволит путем незначительного переоснащения существующих и проектируемых молотковых дробилок повысить их производительность, улучшить качество получаемого продукта, уменьшить удельные энергозатраты, что в конечном итоге снизит себестоимость получаемого продукта.

Методология и методы исследования. Теоретическая часть исследований выполнена с использованием методов и методик, применяемых в физике, математике, теоретической механике, теории машин и механизмов. Единицы измерения использовали в соответствии с международной системой СИ. Экспериментальная

часть выполнялась с использованием теории планирования эксперимента. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики с использованием прикладных программ на ЭВМ.

На защиту выносятся следующие положения:

- конструктивно-технологическая схема молотковой дробилки, в конструкции которой использован регулятор «живого» сечения и частотно-регулируемый привод ротора дробилки и вентилятора;
- аналитические зависимости эффективности использования решета с отверстиями прямоугольной формы;
- результаты экспериментальных исследований влияния конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки на процесс измельчения зерна;
- результаты оптимизации конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, выборе методов и разработке методики проведения исследований, разработке и моделировании аналитических выражений на ЭВМ, разработке и реализации конструкции опытного стенда, проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации опытных данных, формулировке выводов и рекомендаций.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность теоретических и экспериментальных исследований подтверждена высокой степенью детерминации. Материалы и результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались в ходе проведения кафедральных и факультетских заседаний, а также на международных и всероссийских конференциях: «Международная научно-практическая конференция среди студентов, аспирантов и молодых ученых» г. Орел 2011 г., «Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства» г. Орел 2012 г., «Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства» г. Орел 2013 г., «Актуальные проблемы и достижения в сельскохозяйственных науках» г. Самара 2015 г., «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» г. Новосибирск 2015 г. По итогам проведения всероссийского конкурса НТТМ-2014 на ВВЦ г. Москва награжден медалью «За успехи в научно-техническом творчестве».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных статей, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 172 источника, в том числе 14 на иностранном языке и 11 приложений. Работа содержит 152 страницы, 52 рисунка, 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 включает: актуальность темы исследований, 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 «Обзор литературы» представлен анализ состояния и разработанности вопроса. В частности, раскрыто влияние физико-механических свойств фуражного зерна на процесс измельчения, на основании чего можно сказать, что сорто-видовая анизотропия и лабильность прочностных характеристик измельчаемого сырья очень сильно влияют на процесс измельчения, проведен обзор способов измельчения, применяемых в современных и разрабатываемых машинах.

Анализ российского рынка молотковых дробилок говорит о том, что существующие модели представлены как российскими производителями, так и зарубежными с производительностью от 40 кг/ч до 100 т/ч и мощность привода от 0,4 до 405 кВт., а их конструктивно-технологические схемы очень разнообразны, ассортимент очень богат. Но большинство моделей объединяет наличие решета с круглыми отверстиями в дробильной камере, которое необходимо менять при изменении степени измельчения, что снижает эксплуатационные свойства машины.

В. Р. Алешкин, С. В. Мельников, В. И. Сыроватка, А. А. Зеленев, Г. И. Шуб, И. В. Коношин, В. Н. Ткаленко, В. А. Елисеев, А. П. Макаров, И. И. Ревенко и много других авторов при исследовании влияния решета на рабочий процесс высказывают неоднозначный, а иногда и противоречивый результат, а исследования вентилятора дробилки, проводимые Нечаевым В. Н., Касьяновым В. Л., Гиршиным М. Е., Кирпичниковым Ф. С., Игнатьевским Н. Ф., Шень Цзай-Чунь, и другими не дают представления о влиянии режимов работы дробилки на энергозатраты по эвакуации и транспортировании получаемого продукта.

Обзор исследований, выполненных авторами за последнее десятилетие показал, что конструктивные решения, направленные на изменение степени измельчения без остановки технологического процесса, сильно усложняют конструкцию молотковой дробилки, увеличивают ее металлоемкость и снижают надежность. Нередко снижение энергоемкости процесса измельчения приводит к резкому ухудшению качества продукта.

Таким образом, на основе анализа существующих тенденций в области измельчения зерна, учитывая результаты исследований российских и зарубежных ученых можно сказать, что процесс измельчения зерна молотковыми дробилками требует дальнейшего изучения.

Во второй главе «Обоснование совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки» произведено обоснование использования регулятора «живого» сечения, состоящего из решет с отверстиями прямоугольной формы, а также независимого от ротора дробилки привода вентилятора с возможностью изменения частоты вращения.

Выявлено, что в молотковых дробилках, воздушно-продуктовая смесь движется по поверхности решета и деки рыхлым слоем со скоростью равной половине скорости молотков, причем скорость этого слоя у поверхности сита и деки 18-22 % от окружной скорости молотков. Радиальная и осевая составляющие во много раз меньше окружной скорости, поэтому ими можно пренебречь.

В процессе движения частицы диаметром d (рисунок 1) на нее будут действовать силы: R_T - сила тяжести, направленная вертикально вниз, R_A - сила аэродинамического потока, $R_{Ц}$ - центробежная сила. Силы R_A и $R_{Ц}$ направлены по нормали к поверхности решета. R_C - сила лобового сопротивления, R_B - толкающая сила со стороны воздушно-продуктового слоя. Силы R_C и R_B направлены перпендикулярно $R_{Ц}$ и расположены в плоскости вращения ротора дробилки. Результирующая всех сил R запишется в виде:

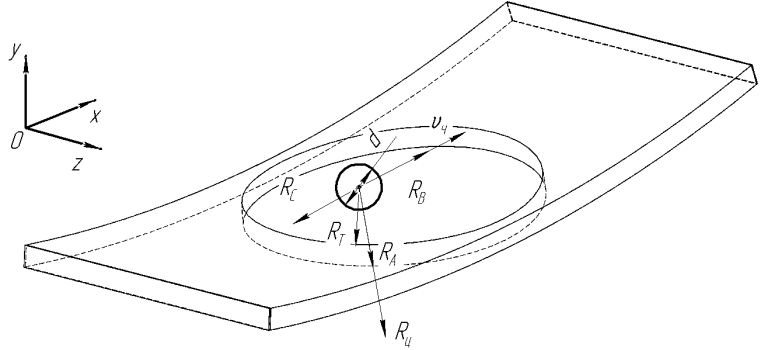


Рисунок 1 - Схема прохождения частицы через отверстие решета

$$\overline{R} = \overline{R_A} + \overline{R_{Ц}} + \overline{R_C} + \overline{R_B} + \overline{R_T} \quad (1)$$

Так как сила тяжести R_T очень мала по сравнению с другими силами, то ей можно пренебречь.

$$R_A = m \cdot k_n \cdot v_a^2, \quad (2)$$

где m - масса частицы, кг; k_n - коэффициент парусности, m^{-1} ; v_a - скорость воздушного потока в отверстии решета, м/с.

$$R_{Ц} = m \cdot \frac{v_{ц}^2}{r}, \quad (3)$$

где r - радиус кривизны решета, м; $v_{ц}$ - окружная скорость частицы, м/с.

Так как движение частицы по поверхности решета равномерное, то:

$$\overline{R_C} + \overline{R_B} = 0, \quad (4)$$

$$R = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^3}{6} \cdot \left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_{ц}^2}{r} \right), \quad (5)$$

где ρ - плотность частицы, $кг/м^3$; d - диаметр частицы, м.

Рассматривая прохождение частицы 1 через отверстие решета с радиусом кривизны r (рисунок 2) в сечении, совпадающим с плоскостью вращения ротора, пограничным условием прохождения частицы 1 диаметром d возле кромки А

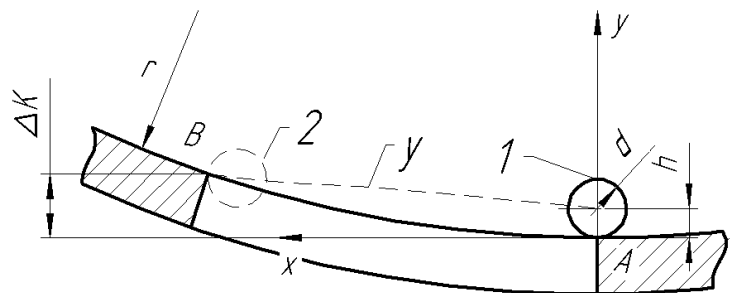


Рисунок 2 - Прохождение частицы через отверстие решета

примем положение, при котором траектория движения ее центра масс будет направлена на кромку B (частица 2).

Запишем неравенство, при соблюдении которого произойдет эвакуация частицы:

$$\Delta K \geq y, \quad (6)$$

где y - координата движения центра тяжести частицы 1.

$$\Delta K \approx r - \sqrt{r^2 - AB^2}, \quad (7)$$

где AB – продольный размер отверстия решета, м.

Для нахождения уравнения движения центра тяжести y воспользуемся системой уравнений:

$$\begin{cases} y = h - \frac{R \cdot \Delta t^2}{2 \cdot m}, \\ x = v_q \cdot \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

где h - начальная координата центра тяжести частицы 1, м; Δt – время движения частицы, с. Здесь:

$$h = \frac{d_{\max}}{2}, \quad (9)$$

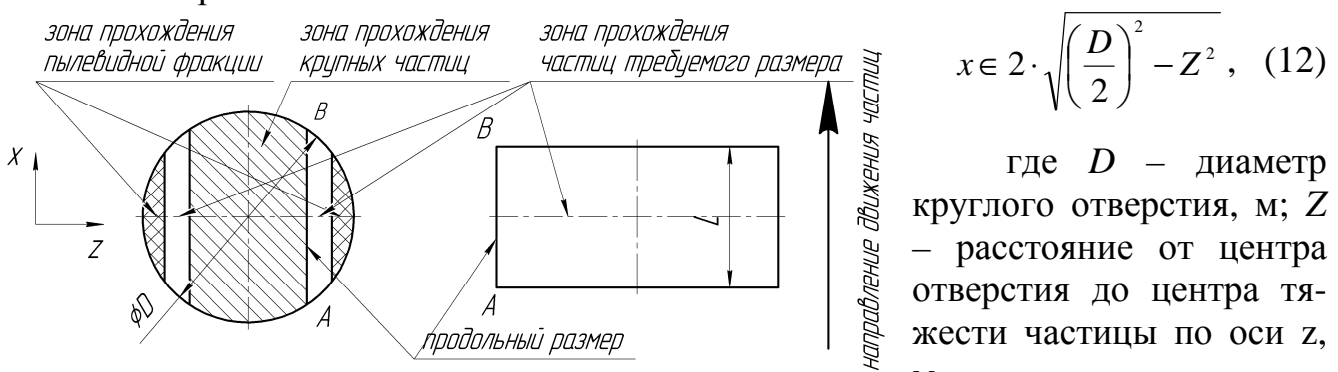
где d_{\max} - максимальный диаметр частицы, м.

Выразив Δt через x , а величину R через выражение 5 получим неравенство:

$$r - \sqrt{r^2 - AB^2} \geq h - \frac{\left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r}\right) \cdot x^2}{2 \cdot v_q^2} \quad (10)$$

$$d_{\max} = \frac{\left(k_n \cdot v_a^2 + \frac{v_q^2}{r}\right) \cdot x^2}{v_q^2} + 2 \cdot \left(r - \sqrt{r^2 - x^2}\right). \quad (11)$$

В решетках с прямоугольной формой отверстий параметр x постоянен и равен продольному размеру L , а с круглой – меняется от 0 до D (рисунок 3) и описывается выражением:



$$x \in 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - Z^2}, \quad (12)$$

где D – диаметр круглого отверстия, м; Z – расстояние от центра отверстия до центра тяжести частицы по оси Z , м.

Рисунок 3 - Обоснование использования решета с прямоугольными отверстиями

Полагая, что в дробильной камере полидисперсный материал движется рыхлым слоем и вероятность попадания частиц в

створ отверстия одинакова получим, что в решетках с круглыми отверстиями в центральной части будут проходить как крупные частицы, так и мелкие, в то время как у края будут эвакуироваться только мелкие частицы. Прямоугольная форма инвариантна, и по всей ширине отверстия созданы одинаковые условия для эвакуации частиц. Поэтому условием нахождения необходимого продольного размера L прямоугольного отверстия является получение дерти одинакового модуля помола M как на решетках с прямоугольной, так и с круглой формой отверстий. Условием нахождения значения L эквивалентному диаметру круглого отверстия D является равенство координат центра тяжести фигур, массой $m_{общ}$, описываемых обоими графиками (рисунок 4).

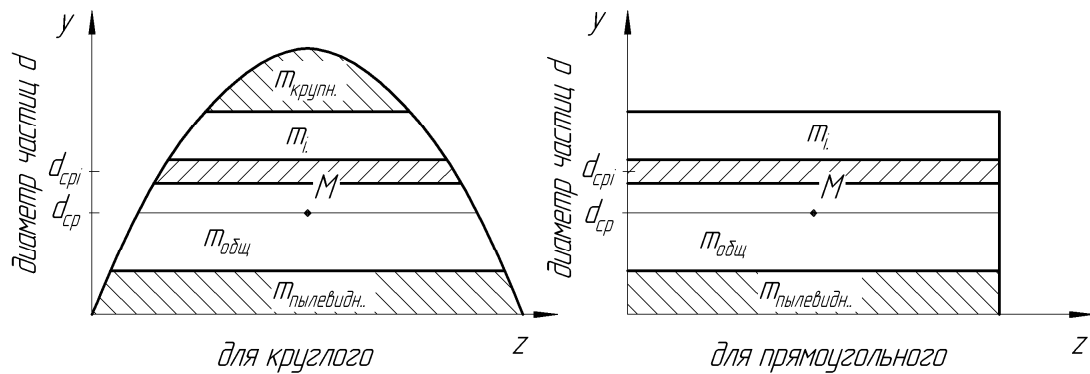


Рисунок 4 - Зависимость максимального диаметра частиц, способных покинуть дробильную камеру по ширине отверстия решета

Координата центра тяжести фигуры, описываемой графиком и есть модуль помола. Ее найдем из выражения:

$$M = \frac{1}{2} \frac{\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} d_{\max}^2 dx}{\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} d_{\max} dx} \quad (13)$$

Проведя вычисления при помощи прикладной программы MathCad 14 получим, что при одинаковых условиях работы молотковой дробилки, с целью получения одинакового модуля помола, продольный размер L прямоугольного отверстия необходимо принять на 10,6 % меньшим чем диаметр круглого отверстия D . Приняв допущения, описанные выше, а также задавшись начальными условиями ($D=6\text{мм}$, $L=5,36\text{ мм}$, $k_n=8\text{ м}^{-1}$, $v_a=32\text{ м/с}$, $v_f=13\text{ м/с}$, $r=0,25\text{ м}$), построим графики удельного содержания частиц диаметром d в дерти, полученной при использовании круглого и прямоугольного отверстий (рисунок 5). Для этого найдем процентное соотношение R_i для каждого класса из уравнения:

$$R_i = \frac{m_i}{m_{общ}} \quad (14)$$

где m_i - масса i -го класса, $m_{общ}$ - масса навески. Используя интегральное исчисление, получим:

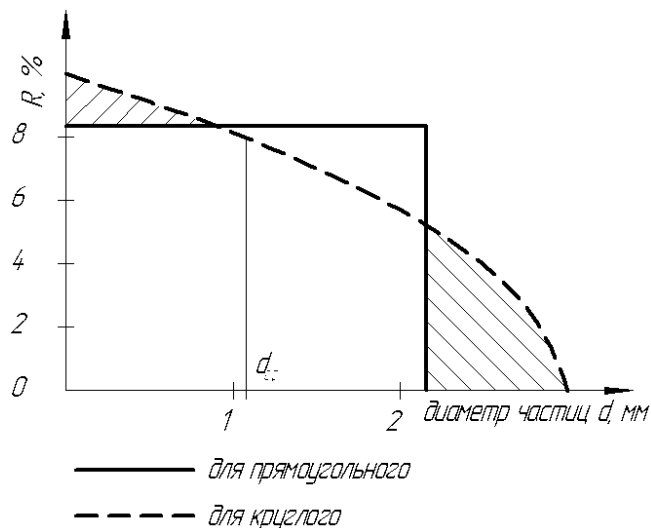


Рисунок 5 - Теоретическое распределение гранулометрического состава

плевидной фракции и крупных частиц. Это позволяет нам утверждать, что получаемая дерть имеет лучшее качество.

Поверхностная теория, сформулированная немецким ученым Риттингером, говорит о том, что работа A_R , затрачиваемая на процесс измельчения, прямо пропорциональна вновь образованной поверхности:

$$A_R = f(\Delta S), \quad (16)$$

где ΔS – площадь вновь образованной поверхности (приращение удельной площади поверхности).

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \quad (17)$$

где ΔS_i - площадь образованной поверхности в i -том классе, n - количество классов.

$$\Delta S_i = 6 \cdot \frac{m_i}{\rho} \left(\frac{D_{\text{экв}} - d_{\text{cp}i}}{D_{\text{экв}} \cdot d_{\text{cp}i}} \right), \quad (18)$$

где $d_{\text{cp}i}$ и - средний диаметр частиц в i -том классе, $D_{\text{экв}}$ - эквивалентный диаметр зерна.

Заменив m_i на выражение 15, приняв допущения, описанные выше, а также задавшись начальными условиями, построим график распределения приращения поверхности в навеске массой 100 г., полученной при использовании круглого и прямоугольного отверстий (рисунок 6).

Используя численный результат, полученный при помощи MathCad 14, а также график на рисунке 6, можно сказать, что суммарное приращение поверхности для материала, полученного при использовании решет с круглыми отверстиями больше, нежели чем с прямоугольными на 11,2 %. Окончательно удельная энергоёмкость q запишется как:

$$R_i = \frac{\int_{d_{\text{cp}i}^{\text{min}}}^{d_{\text{cp}i}^{\text{max}}} d_{\text{max}}^{\text{inv}} dy}{\int_0^{d_{\text{max}}} d_{\text{max}}^{\text{inv}} dy}, \quad (15)$$

где $d_{\text{cp}i}^{\text{min}}$ и $d_{\text{cp}i}^{\text{max}}$ - минимальный и максимальный диаметр частиц в i -том классе, d_{max} - максимальный диаметр частиц, $d_{\text{max}}^{\text{inv}}$ - функция обратная d_{max} .

Из графика на рисунке 5 видно, что гранулометрический состав продукта, получаемого при использовании решет с отверстиями прямоугольной формы, имеет меньшее содержание пылевидной фракции и крупных частиц.

$$q = \frac{f(\Delta S)}{m_{\text{общ}}} \quad (19)$$

Из выражения следует, что приращение поверхности влечет увеличение энергозатрат. Это значит, что удельная энергоемкость измельчения на решетках с прямоугольными отверстиями ниже чем на решетках с круглой формой отверстий.

Как было отмечено, для эвакуации получаемого продукта, широкое распространение получил вентилятор. Энергоемкость пневмотранспортирования высока, поэтому ее снижение является актуальной задачей. Рассмотрим как влияет изменение модуля помола, вызванное изменением режима работы дробилки, а также увеличение площади поверхности корма на энергоемкость пневмотранспортирования.

При движении частицы 2 в трубопроводе 1 (рисунок 7) на всю ее поверхность будут действовать силы:

$$\begin{aligned} X &= \int_{d\Sigma} (p \cdot \cos(p, x) + \tau \cdot \cos(\tau, x)) d\Sigma \\ Y &= \int_{d\Sigma} (p \cdot \cos(p, y) + \tau \cdot \cos(\tau, y)) d\Sigma \\ Z &= \int_{d\Sigma} (p \cdot \cos(p, z) + \tau \cdot \cos(\tau, z)) d\Sigma, \end{aligned} \quad (20)$$

где X - сила лобового сопротивления; Y - подъемная сила; Z - боковая сила, p и τ - нормальные и касательные напряжения.

С увеличением степени измельчения растет удельная поверхность частиц, следовательно, возрастает суммарное воздействие сил X , Y и Z , отнесенное ко всему транспортируемому продукту, как следствие возрастает энергоемкость пневматической транспортировки.

В своих исследованиях Ж. Зеглер, Минко В. А. и Феоктистов Ю. А. получили следующую экспериментальную зависимость потерь давления в трубопроводе:

$$\Delta H = \lambda \frac{l_T}{D_T} \frac{\rho_6 v_6^2}{2}, \quad (21)$$

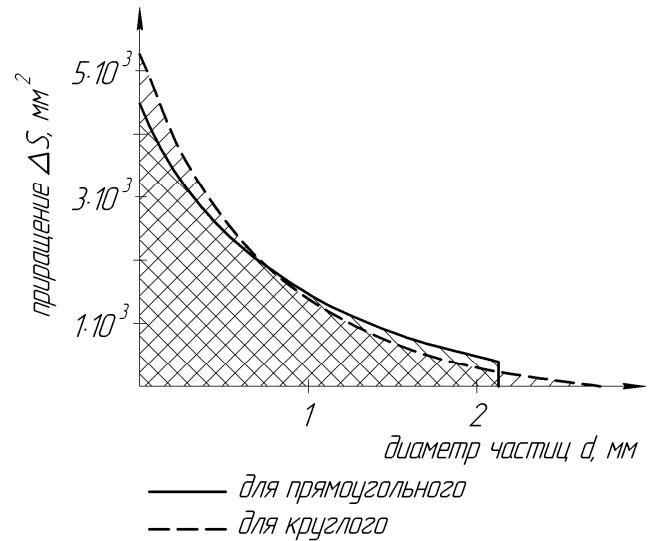
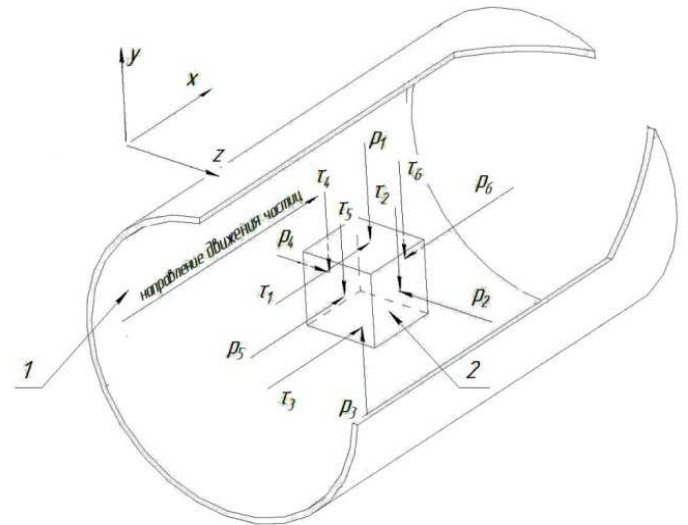


Рисунок 6 - Теоретическое распределение приращения поверхности



1 - стенки трубопровода, 2 - измельченная частица

Рисунок 7 - Схема движения измельченной частицы в трубопроводе

где λ - коэффициент, учитывающий затраты на транспортировку материала, l_T - длина трубопровода, м, D_T - диаметр трубопровода, м; ρ_g - плотность воздуха, кг/м³, v_g - скорость воздуха в трубопроводе, м/с.

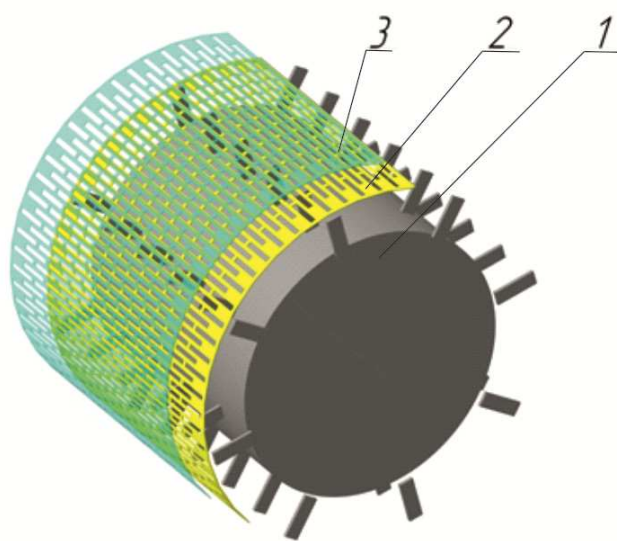
$$\lambda = \lambda_o + \lambda_{\sigma} + \lambda_g + \lambda_2, \quad (22)$$

где λ_o - к-т трения воздуха о стенки трубы, λ_{σ} - к-т трения воздуха о материал, λ_g - к-т трения материала о стенки трубы, λ_2 - к-т трения частиц друг о друга. Величинами λ_2 и λ_g авторы в расчетах пренебрегают.

$$\lambda_{\sigma} = \frac{4 \cdot G_M}{\pi \cdot D_T^2 \cdot v_g} \cdot \frac{\left(1 - \frac{v_n}{v_g}\right)^3}{\frac{v_n}{v_g} \cdot v_{вит}}, \quad (23)$$

где G_M - массовый расход материала, кг/с; v_n - скорость материала, м/с; $v_{вит}$ - скорость витания частиц материала, м/с.

Из выражения видно, что с уменьшением λ и v_g уменьшаются потери давления в пневмотранспортной системе. Однако с уменьшением $v_{вит}$ при неизменном режиме работы вентилятора возрастает коэффициент λ_{σ} , входящий в λ . Это говорит о том, что мелкоизмельченные частицы, имеющие маленькую скорость витания $v_{вит}$, создают большие потери давления в трубопроводе.



1- молотковый ротор; 2 - неподвижное решетчатое кольцо; 3 - подвижное решетчатое кольцо
Рисунок 8 - Схема регулятора «живого» сечения

Дерть, полученная с использованием решетчатой прямоугольной формы отверстий, имеет меньшее содержание мелких частиц и меньшую площадь поверхности по сравнению с круглой, поэтому энергоёмкость пневмотранспортирования также снизится.

С целью улучшения эксплуатационных свойств дробилки, а также получения возможности менять степень измельчения без остановки технологического процесса, предложено использовать регулятор «живого» сечения (рисунок 8), выполненный в виде подвижного 3 (с возможностью перемещения по окружности дробильной камеры) и неподвижного 2 решетчатых колец с отверстиями прямоугольной формы.

Перемещение решетки 3 повлечет за собой изменение продольного размера «живого» сечения AB , как следствие изменится средний размер частиц получаемого продукта. Использование предложенного конструктивного решения позволит бесступенчато изменять степень измельчения непосредственно в процессе работы молотковой дробилки, что позво-

лит не останавливать технологическую линию. Кроме того, вместо комплекта решет не необходимо использовать два решета.

В третьей главе «Программа и методика проведения экспериментальных исследований» в соответствии с поставленными целями и задачами была разработана и реализована программа экспериментальных исследований, которая включает:

1. Разработку конструктивно-технологической схемы экспериментальной молотковой дробилки;
2. Выбор критериев оптимизации;
3. Подбор измерительных приборов и аппаратуры;
4. Выполнение экспериментальных исследований;
5. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров дробилки зерна на качественно-количественные показатели процесса измельчения и определение оптимальных значений.

С целью проведения практической оценки результатов теоретического исследования нами была изготовлена экспериментальная установка на базе молотковой дробилки КДУ-2,0 (рисунки 9,10).



Рисунок 9 - Экспериментальная установка



Рисунок 10 – Регулятор «живого» сечения в дробильной камере

Контрольно-измерительная аппаратура (таблица 1) определялась исходя из максимума достоверности и минимума стоимости при оптимальном классе точности по методике Сергея А. Г.

При планировании эксперимента использовалась методика с применением плана Бокса-Бенкена. Опыты проводились рандомизированно с трехкратной повторностью. Для построения математических моделей использовалась программа «Statistica 10».

Учитывая анализ работ по оптимизации конструктивно режимных параметров молотковой дробилки, в качестве параметров оптимизации приняли следующие показатели:

1. Удельную энергоёмкость с учетом степени измельчения $\mathcal{E}_{эф.общ.}$, кВт·ч/т·ед. ст.изм;
2. Модуль помола M , мм;
3. Содержание пылевидной фракции m_0 , %;
4. Остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм m_3 , %.

Таблица 1 – Измерительные приборы, регистрирующая и регулирующая аппаратура, применяемые при проведении эксперимента

Наименование	Марка	Кл. точности	Предел измерения	Назначение
Комплект измерительный	К 505	0,5	С тр. тока до 360 кВт	Измерение мощности
Трансформатор тока	Т-0,66(М)	0,5	до 50 А до 100 А	Измерение приборами больших значений силы тока
Весы платформенные	ВТ8908-200УС	средний (III)	0,1 - 200 кг	Определение массы измельчаемого материала
Весы лабораторные	Vibra SJ 620	высокий (II)	0,5 – 620 г	Определение массы проб и остатка на ситах
Ситовой класс-р	У1-ЕРЛ	-	до 100 г	Рассев проб
Секундомер	СОС пр-26-2-000	высокий (II)	0,2 с – 60 мин	Регистрация временных интервалов
Частотный преобразователь	Веспер Е2-8300	0,5	до 400 Гц	Изменение частоты вращения вала электродвигателя
Цифровой лазерный тахометр	AR926	0,5	от 2,5 до 99 999 об/мин	Измерение частоты вращения вала электродвигателя

Для определения оптимального типоразмера решет предварительно был проведен поисковый однофакторный трехуровневый эксперимент с ячейками регулятора «живого» сечения 4x30 мм, 6x35 мм, 8x40 мм и 10x45 мм. В ходе эксперимента окружная скорость молотков и частота вращения вентилятора соответствовали номинальному режиму работы дробилки КДУ-2,0 и составили 70м/с и 2860 мин⁻¹ соответственно. Подача материала равнялась 0,63 кг/с, что также соответствует номинальной производительности данной дробилки.

По результатам предварительного эксперимента, с целью выявления математической зависимости влияния режимов работы молотковой дробилки на параметры оптимизации использовали четырехфакторный эксперимент, построенный по плану Бокса-Бенкена. Уровни варьирования устанавливались таким образом, чтобы обеспечивалась бесперебойная работа молотковой дробилки, а также в соответствии с рекомендациями других авторов (таблица 2).

Таблица 2 – Условия основного эксперимента

Наименование параметров оптимизации	Кодированное обозначение	Ед. изм	Уровни варьирования		
			-1	0	1
Продольный размер «живого» сечения	l	мм	3	5	8
Окружная скорость молотков	v_m	м/с	63	70	77
Частота вращения вентилятора	n	мин ⁻¹	2574	2860	3146
Подача зерна	Q	кг/с	0,45	0,63	0,81

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены экспериментальные исследования регулятора «живого» сечения, а также эффективности его использования.

В ходе предварительного эксперимента было выяснено, что дерть, получаемая при использовании решет с типоразмером ячеек 4x30 и 6x35 мм по гранулометрическому составу малопригодна при кормлении сельскохозяйственной птицы. В то же время дерть, полученная при постановке решет с ячейкой 10x45 мм, имеет повышенное содержание недоизмельченных частиц и целых зерен, поэтому ее нельзя использовать при кормлении свиней, овец, лошадей и КРС. Дерть, получаемая при установке решет с ячейкой 8x40 мм пригодна для кормления всех сельскохозяйственных животных в соответствии с требованиями ГОСТа и исследований других авторов. Поэтому дальнейшие исследования проводились при установке этих решет.

По результатам анализа экспериментальных данных было выяснено, что дерть, полученная при использовании регулятора «живого» сечения, имеет меньшее содержание пылевидной фракции (рисунок 11) и крупных частиц (рисунок 12), оцененных остатком на сите с диаметром отверстий 3 мм в сравнении с решетками с круглой формой отверстий.

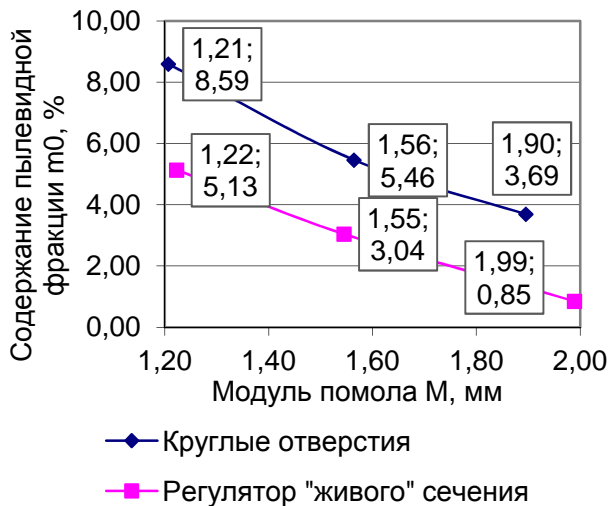


Рисунок 11 – Содержание пылевидной фракции

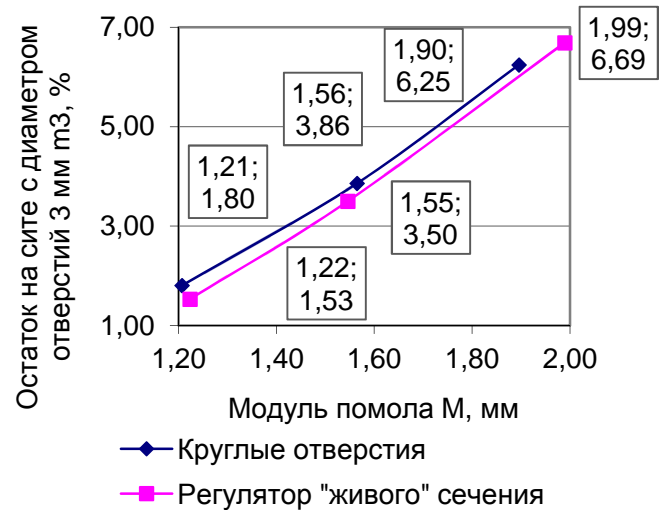


Рисунок 12 – Остаток на сите с диаметром отверстий 3 мм

Анализ однородности гранулометрического состава, полученного при использовании регулятора «живого» сечения, говорит о том, что дерть имеет лучшую однородность по сравнению с решетками с круглыми отверстиями. При модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм средневзвешенное квадратическое отклонение составило 0,78, 0,86 и 0,88, в то время как при использовании регулятора «живого» сечения эти показатели составили 0,65, 0,74 и 0,72 для модуля помола 1,22, 1,55 и 1,99 мм соответственно.

Анализируя коэффициент вариации гранулометрического состава в готовом продукте, показывающий какую долю среднего значения составляет его разброс, следует отметить, что он составил для решет с круглыми отверстиями 64,6, 55,2 и 46,2 % при модуле помола 1,21, 1,56 и 1,90 мм, что выше значений, полученных

при использовании регулятора «живого» сечения, которые составили 53,3, 48,0 и 36 % при модуле помола 1,22, 1,55 и 1,99 мм соответственно.

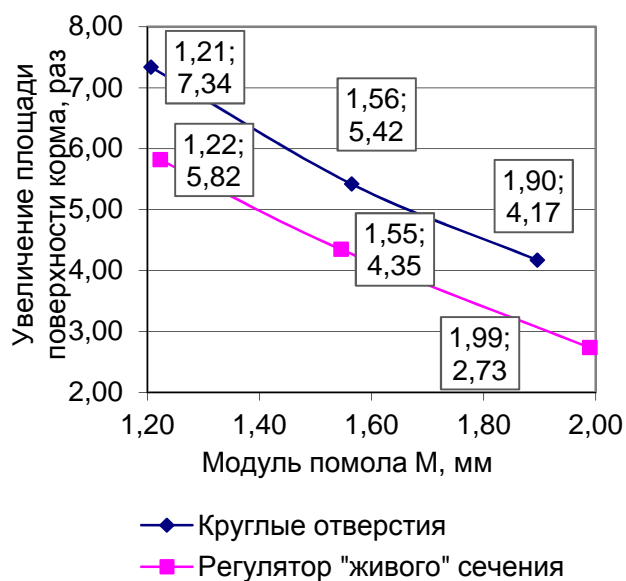


Рисунок 13 – Приращение поверхности дерти

меньше, чем при использовании решет с круглыми отверстиями.

Анализ графиков, представленных на рисунке 14 показывает, что энергоемкость измельчения при использовании регулятора «живого» сечения, предложенной конструкции значительно ниже энергоемкости при использовании решет с круглыми отверстиями.

Исследуя графики на рисунке 15 было выявлено, что мощность на валу вентилятора $P_{эф.в}$ при пневмотранспортировании дерти, полученной при использовании решет с круглыми отверстиями выше чем при использовании регулятора «живого» сечения.

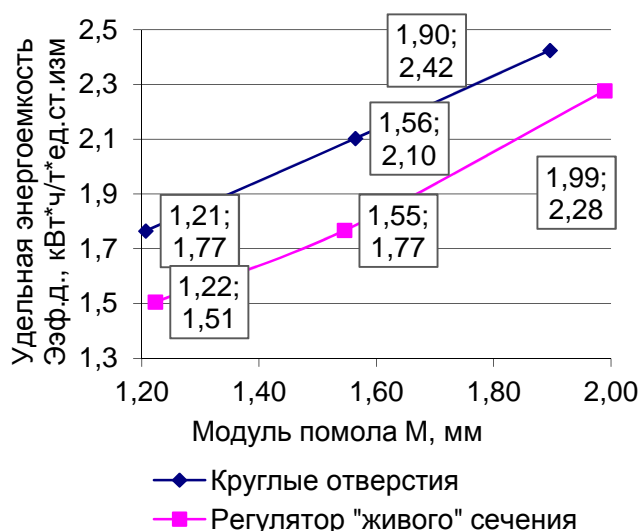


Рисунок 14 - Удельная энергоемкость измельчения $\mathcal{E}_{эф.д}$

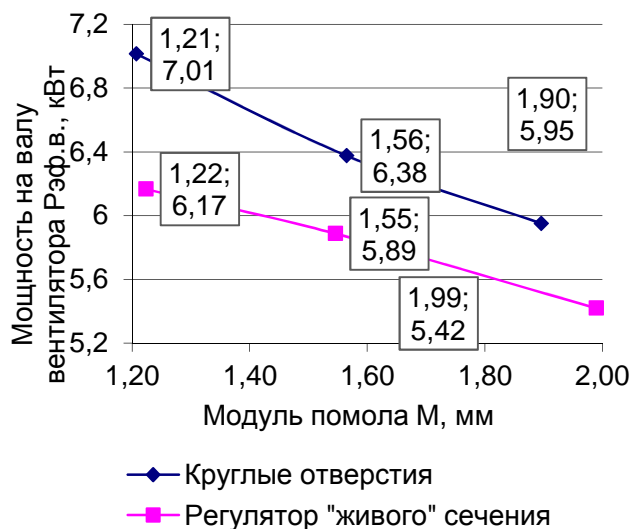


Рисунок 15 - Удельная энергоемкость пневмотранспортирования $P_{эф.в}$

В ходе теоретического исследования было выяснено, что энергия расходуется на приращение поверхности корма и пневмотранспортирование. С целью оценки энергоэффективности предстояло сравнить удельную энергоемкость измельчения $\mathcal{E}_{эф.д}$ и пневмотранспортирования $P_{эф.в}$ при использовании регулятора «живого» сечения и решет с круглыми отверстиями.

Приняв допущение, что частицы корма имеют шарообразную форму получим распределение приращения поверхности (рисунок 13). Из рисунка видно, что увеличение поверхности дерти одинакового модуля помола при использовании регулятора «живого» сечения

Экспериментальные зависимости, представленные на рисунке 14 подтверждают поверхностную теорию, сформулированную немецким ученым Риттингером, говорящую о том, что энергия, расходуемая на измельчение, идет на увеличение площади поверхности корма. Кроме того, вследствие того, что ниже площадь поверхности корма, снижается и энергоёмкость процесса пневмотранспортирования. Полученные экспериментальные зависимости подтверждают теоретические исследования.

В своих исследованиях Филин В. М. пришел к выводу, что дерть с меньшим модулем помола имеет меньшую скорость витания, т. е. для ее эвакуации необходима меньшая скорость воздуха. Снижение частоты вращения вентилятора с 3146 до 2546 мин⁻¹ при установленном продольном размере «живого» сечения 3 мм, окружной скорости молотков 70 м/с и подаче материала 0,63 кг/с снижает мощность на валу вентилятора с 8,83 до 4,83 кВт. При этом обеспечивается бесперебойная эвакуация материала. Регулировка частоты вращения вентилятора позволяет существенно изменить удельную энергоёмкость $\mathcal{E}_{эф.общ.}$.

С целью получения математической модели процесса измельчения зерна был реализован план эксперимента Бокса-Бенкена для четырех факторов. По экспериментальным данным при помощи программы Statistica 10 были получены коэффициенты уравнения регрессии (таблица 3).

Таблица 3 – Коэффициенты уравнений регрессии

	Коэффициенты уравнений регрессии			
	M	m3	m0	Ээф. общ.
Mean/Interc.	6,131288	226,8641	31,25205	22,3089
Block(1)	0,016156	0,051235	-0,043968	0,066376
Block(2)	-0,000729	0,237494	-0,090239	-0,043024
(1)Продольный размер "живого" сечения, мм(L)	0,488896	1,133806	-1,946502	0,675889
Продольный размер "живого" сечения, мм(Q)	-0,000107	-0,028165	0,068524	0,000141
(2)Окружная скорость молотков, м/с(L)	-0,080948	-4,911258	-0,429515	-0,081745
Окружная скорость молотков, м/с(Q)	0,000554	0,032206	0,002623	0,001184
(3)Частота вращения вентилятора, мин-1(L)	-0,001745	-0,032363	-0,002553	-0,013879
Частота вращения вентилятора, мин-1(Q)	0	0,000005	-0,000001	0,000003
(4)Подача, кг/с(L)	-0,009559	-11,42003	-16,81144	0,954919
Подача, кг/с(Q)	0,737763	11,46874	5,904346	9,153922
1L by 2L	-0,004236	-0,041559	-0,013935	-0,003404
1L by 3L	0,000001	0,001273	0,000577	-0,000015
1L by 4L	-0,07046	-0,748679	-0,506963	-0,354741
2L by 3L	0,000001	0,000089	0,00006	-0,000013
2L by 4L	-0,009565	0,026836	0,156311	-0,055806
3L by 4L	-0,000261	-0,002446	0,001902	-0,003801

Полученные уравнения регрессии описывают процесс с высокой достоверностью, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации, принимающим значения более 0,8, что соответствует принятым нормам. Кроме того, математические зависимости, описываемые уравнениями регрессии, позволили нам оптимизировать конструктивно-режимные параметры дробилки. Так с целью получения дерти модулем помола 1,22 мм удельную энергоёмкость при использовании

регулятора «живого» сечения возможно снизить с 2,18 до 2,08 кВт·ч/т·ед.ст.изм. Подобный результат достигается и при получении дерти с другим модулем помола. Удельную энергоёмкость возможно снизить с 2,44 до 2,37 кВт·ч/т·ед.ст.изм для модуля помола 1,55 мм, а для 1,99 мм с 3,29 до 3,11 кВт·ч/т·ед.ст.изм.

В пятой главе «Экономическая эффективность предлагаемого решения» проведена сравнительная оценка экономической эффективности работы предлагаемой молотковой дробилки с серийно выпускаемой КДУ-2,0. При сравнении использовалось зерно ячменя сорта «Урса» влажностью 13,2 % и соответствующее ГОСТ 28672-90. По итогам сравнительной оценки получен результат, говорящий о том, что удельная энергоёмкость $\mathcal{E}_{эф.общ.}$ при использовании регулятора живого сечения снизилась на 12,81 %, а оптимизация работы вентилятора позволяет достигнуть 24,38% снижения. Производительность оптимизированной молотковой дробилки возросла на 28,57 %, а эксплуатационные затраты снизились на 17,24 % и в стоимостном выражении экономия составила 31829,2 руб/год, содержание в готовом продукте пылевидной фракции и крупных частиц снизилось на 45,05 % и 22,28 % соответственно, выравненность гранулометрического состава, оцененная средневзвешенным квадратическим отклонением, улучшилась на 13,95 %. Окупаемость проекта составляет 2,55 года. Экономический эффект достигнут за счет снижения удельных энергозатрат, уменьшения содержания пылевидной фракции и остатка на сите с диаметром отверстий 3 мм, а также повышения производительности.

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Энергоёмкость измельчения и эффективность скармливания кормов можно улучшить за счет уменьшения содержания пылевидной фракции и недоизмельченных частиц путем совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки;
2. Проведенный обзор существующих конструкций измельчающих машин выявил их существенные недостатки. Принимая во внимание наметившиеся тенденции, была разработана молотковая дробилка, отличающаяся тем, что в ее конструкции используется регулятор «живого» сечения, выполненный в виде подвижного и неподвижного решет с отверстиями прямоугольной формы (патент на изобретение РФ № 2520653). В конструкции дробилки ротор и вентилятор имеют независимый привод с изменяемой скоростью вращения.
3. В ходе теоретического обоснования получены аналитические зависимости, отличающиеся тем, что отображают влияние прямоугольной и круглой формой отверстий на качественные и энергетические показатели корма.
4. Анализ уравнений регрессии позволяет установить рациональные конструктивно-режимные параметры молотковой дробилки, способствующие получению продукта с заданными параметрами и минимальной удельной энергоёмкостью.
5. Результаты эксперимента подтверждают аналитические зависимости, а работа оптимизированной молотковой дробилки показывает, что дерть с модулем помола 1,56 мм, полученная с использованием регулятора «живого» сечения име-

ет по сравнению с решетками с круглыми отверстиями на 45,05 % и 22,28 % меньшее содержание пылевидной фракции и недоизмельченных частиц соответственно. Коэффициент вариации улучшился на 14,02 %, а средневзвешенное квадратическое отклонение – на 13,95 %, что позволяет говорить о улучшении выравниваемости дерти. Теоретические исследования по изучению изменения площади поверхности корма подтвердились экспериментально. Дерьт с модулем помола 1,56 мм полученная при использовании регулятора «живого» сечения имеет на 20,22 % меньшую суммарную площадь по сравнению с решетом с круглой формой отверстий. Данное изменение привело к снижению удельной энергоемкости измельчения и пневмотранспортирования, а общие удельные энергозатраты $\mathcal{E}_{\text{эф.общ}}$ снизились (в т. ч. за счет оптимизации работы вентилятора) на 24,25 %.

б. Дана экономическая оценка использования предложенного решения, а также проведено сравнение эксплуатационных затрат с серийно выпускаемой дробилкой КДУ-2,0, которое говорит, что производительность возросла на 28,57 %, а эксплуатационные затраты проекта на 17,24 % меньше базового варианта и в стоимостном выражении экономия составила 31829,20 руб/год. Окупаемость проекта составляет 2,55 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензированных журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Коношин И.В. Использование в молотковых дробилках решёт с регулируемым живым сечением [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Звекон, А.В. Черепков // Кормопроизводство. – 2014. – № 1. – С. 44–48.

2. Черепков А.В. Использование в молотковых дробилках решет с регулируемым живым сечением [Текст] / А.В. Черепков, И.В. Коношин // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 2. – С. 7–8.

3. Черепков А.В. Применение в молотковых дробилках решет с прямоугольными отверстиями [Текст] / А.В. Черепков, И.В. Коношин // Главный механик. – 2013. – № 13. С. 34–36.

Статьи в других изданиях

4. Коношин И.В. Обоснование оптимизации скоростного режима вентилятора молотковой дробилки [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Черепков // Актуальные проблемы и достижения в сельскохозяйственных науках: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Самара: ИЦРОН, 2015. – С. 40–43.

5. Коношин И.В. Перспективный способ регулирования степени измельчения сыпучих продуктов в молотковых дробилках [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Черепков // Агротехника и энергообеспечение. – 2014. – Т. 1. – № 1 – С. 178–181.

6. Коношин И.В. Повышение эффективности функционирования молотковых дробилок при измельчении зерна [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Звекон, А.В. Черепков // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2014. – № 1. – С. 127–132.

7. Коношин И.В. Совершенствование процесса измельчения фуражного зерна с обоснованием конструктивно-режимных параметров измельчения [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Черепков // Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производства: сборник материалов к Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Орел: ФГБОУ ВПО «ОрелГАУ», 2011. – С. 58–63.

8. Коношин И.В. Современные тенденции использования дробилок зерна [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Черепков // Особенности технического оснащения современного сельскохозяйственного производства: сборник материалов к Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Орел: ФГБОУ ВПО «ОрелГАУ», 2012. – С. 87–92.

9. Коношин И.В. Теоретическое обоснование использования подвижного и непожвижного решет с прямоугольными отверстиями в молотковых дробилках [Текст] / И.В. Коношин, А.В. Черепков // Особенности технического и технологического оснащения современного сельскохозяйственного производств: сборник материалов международной научно-практической конференции. – Орел: ФГБОУ ВПО «ОрелГАУ», 2013. – С. 103–109.

10. Черепков А.В. Результаты совершенствования конструктивно-режимных параметров молотковой дробилки [Текст] / А.В. Черепков, И.В. Коношин // Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия: сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Educatio, 2015. – С. 57–59.

Патент

11. Пат. № 2520653 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/04. Молотковая дробилка / Коношин И.В., Черепков А.В. – № 2012149728/13; заявлено 21.11.2012; опубл. 27.06.2014. – Бюл. № 18. – 8 с.

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, ученому секретарю. Телефон (473) 253-75-35, 8-900-924-5638, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 14.04.2016 г. Формат 60x84 1/16
Печатается на ризографе. Бумага офсетная
Гарнитура Times. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ №

Лицензия ПД № 8– 0023 от 25.09.2000 г.
Отпечатано с готового оригинал– макета
в ООО Полиграфическая фирма «Картуш»
г. Орел, ул. 2– я Посадская, 26. Тел./факс (4862) 44– 51– 46.
E– mail: kartush@orel.ru www.kartush– orel.ru