

На правах рукописи

Стригунова Надежда Юрьевна

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ СТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ
С РАБОЧИМ ОРГАНОМ
МОЛОТКОВО-СЕГМЕНТНОГО ТИПА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Фролов Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: **Доценко Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», кафедра «Сервисных технологий и общетехнических дисциплин», профессор

Сабиев Уахит Калижанович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Омский ГАУ имени П.А. Столыпина», кафедра «Агроинженерии», профессор;

Ведущая организация: Азово-Черноморский инженерный институт - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде

Защита состоится «__» _____ 2022 года в ____⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 220.038.08 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, Кубанский ГАУ, корпус факультета механизации, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 года и размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <http://vak3.ed.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <http://kubsau.ru/>

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор
Фролов Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В 2020 году доля фермерской сельхозпродукции в ее валовом производстве в стране увеличилась с 13,7 % до 14,3 %. При этом индекс производства превысил 103,8 % — это наибольший темп роста в сельском хозяйстве. Именно малыми предприятиями обеспечен рост поголовья и в целом положительная динамика в российском животноводстве по итогам прошлого года. За последние пять лет в КФХ прирост производства скота и птицы составил 25 %, молока — 38 %, яиц — 45 % - по данным министерства сельского хозяйства РФ.

Кубань – лидер в России по производству молока – 1,5 млн тонн, средний надой на корову составил 8098 кг, это на 1 тонну выше общероссийского показателя. Регион создает современный животноводческий комплекс с высокотехнологичным оборудованием.

Вопросы кормозаготовки на Кубани очень актуальны, так как стоит задача обеспечения отрасли животноводства качественными кормами. Заготовку кормов аграрии ведут с постоянной проверкой качества и использованием современных технологий, предложенных учеными аграриями. Прочная кормовая база позволит животноводам Кубани реализовать высокий генетический потенциал крупного рогатого скота и получить увеличение объемов молока и другой животноводческой продукции.

Фермеры Кубани играют большую роль в животноводстве. Ими произведено до 30 % продукции. Администрация края осуществляет поддержку фермерам: гранты, льготные кредиты. Но высокотехнологичного оборудования для производства кормов недостаточно. Поэтому задача разработки кормоизмельчителя с рабочим органом молотково-сегментного типа, который готовит качественные корма, является задачей актуальной, очень важной для хозяйств малых форм собственности.

Степень разработанности темы. Теоретические методики и практические разработки по подготовке стебельных кормов к скармливанию, а именно измельчению кормов, заложили академики В.П. Горячкин, В.А. Жилеговский. Продолжили работы по исследованию приемов и оборудования для измельчения кормов ученые: Г.М. Кукта, С.В. Мельников, Н.Е. Резник, П.М. Роцин, П.А. Савиных, В.И. Сыро-

ватко, В.Р. Алешкин, В.Г. Коба, В.Е. Тупицын, Д.Н. Кошурников, В.Е. Косолапов, О.П. Матушкин, А.А. Рылов, М.Н. Тимофеев, В.Ю. Фролов, И.Н. Краснов, С.М. Доценко, С.В. Брагинец и др.

Как показал анализ результатов исследований вышеуказанных ученых недостаточно внимания было уделено комбинированному рабочему органу молотково-сегментного типа, так как ранее исследования проводились отдельно на молотковых дробилках и измельчителях ножевого типа.

Рабочая гипотеза. Совершенствование поточно-технологической линии приготовления кормов на фермах путем внедрения измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа позволит получить высокие качественные показатели, уменьшить энерго- и трудозатраты.

Цель работы – повышение эффективности процесса измельчения путем обоснования параметров и режимов работы измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа.

Объект исследования - технологический процесс приготовления кормов на животноводческой ферме измельчителем стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа.

Предмет исследования - зависимости процесса приготовления кормов, изучение действия сил на стебельные корма в процессе резания в измельчителе с рабочим органом молотково-сегментного типа.

Задачи исследований.

1. Выявить современные тенденции развития технических средств измельчения стебельных кормов, применимых в хозяйствах малых форм собственности, и усовершенствовать классификацию оборудования подготовки кормов к скармливанию животным, позволяющую определить перспективное направление для разработки нового технического средства и обосновать его конструктивно-технологическую схему.

2. Выявить аналитические зависимости технологического процесса измельчения стебельных кормов измельчителем с рабочим органом молотково-сегментного типа, определить рациональные параметры и режимы его работы.

3. Обосновать конструктивно-технологические параметры измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа.

4. Провести экспериментальные исследования процесса измельчения стебельных кормов измельчителя с рабочим органом молотково-сегментного типа.

5. Дать экономическую оценку эффективности внедрения предложенного измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа.

Научная новизна работы:

- параметры и режимы работы измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа, которые позволили снизить энергоемкость и металлоемкость технологического процесса;

- аналитические зависимости качества получаемого корма от размеров измельчающей камеры и режущих элементов, позволяющие наметить перспективные направления в разработке технических средств для измельчения кормов;

- конструктивно-технологические параметры процесса измельчения кормов измельчителем с рабочим органом молотково-сегментного типа, позволяющие на стадии проектирования обосновать наиболее рациональную конструктивную схему технических средств;

- уравнения регрессии для модуля помола и энергоемкости.

Теоретическая и практическая значимость исследований.

Обоснована поточно-технологическая линия приготовления стебельных кормов на фермах, предложен измельчитель с рабочим органом молотково-сегментного типа, изучены закономерности работы оборудования для приготовления кормов.

Получены аналитические зависимости определения модуля помола и энергоемкости.

Разработана классификация машин для измельчения кормов, на основе которой выявлены перспективные направления и предложен измельчитель кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа.

Получены параметры и режимы работы, которые позволили разработать измельчитель стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа. Новизна технического решения подтверждена патентом на изобретение РФ № 2639326.

Уравнения регрессии позволили получить оптимальные значения факторов, влияющих на модуль помола и энергоемкость процесса.

Методы исследований.

Эксперименты выполнялись в лабораторно-производственных условиях. Применяемые приборы, датчики соответствуют ГОСТам и техническим требованиям, результаты обрабатывались методом планирования многофакторного эксперимента. Обработка полученных результатов выполнялась методом математической статистики MathCad, Microsoft Excel, Statistica 7.0.

Основные положения, выносимые на защиту:

- экспериментальная поточно-технологическая линия приготовления кормов, содержащая измельчитель стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа;
- аналитические зависимости качества получаемого корма от конструктивных особенностей режущей пары измельчителя;
- экспериментальные зависимости процесса измельчения, позволяющие определить направление развития техники для получения корма высокого качества с наименьшими энерго- и трудозатратами;
- результаты сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

Апробация результатов.

Итоги исследований обсуждались на заседаниях кафедры «Механизации животноводства и БЖД» Кубанского ГАУ, научных и научно-практических конференциях: X Всероссийская конференция молодых ученых (Краснодар, 26–30 ноября 2016 г.); Научное обеспечение агропромышленного комплекса (Краснодар, 12 апреля 2016 г.); Всероссийская молодежная научная конференция «Инновационные энерго-ресурсосберегающие технологии и техника XXI века» (Ростов-на-Дону, 3 марта 2017 г.); Научное обеспечение агропромышленного комплекса (Краснодар, 1 февраля – 1 марта 2017 г.); 73-я научно-практическая конференция студентов по итогам НИР в 2017 году (Краснодар, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Проблемы развития технического потенциала и направления его повышения» (Оренбург, 23 января 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях» (Тюмень, 4 февраля 2019

г.); I и II этап Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению: «Технические науки», (Волгоград, апрель 2021 г.); XIV Международный салон изобретений и новых технологий «Новое время», получены диплом и серебряная медаль (Севастополь, 27–29 сентября 2018 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 28 научных работ, из них 4 статьи, включенных в текущий перечень ВАК, 1 патент РФ, 1 публикация в журнале Web of Science, 1 публикация в Scopus. Общий объем публикаций 4,88 печ. л., из которых 2,4 печ. л. принадлежат лично автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 143 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 121 наименования, приложений, а также содержит 45 рисунков и 29 таблиц.

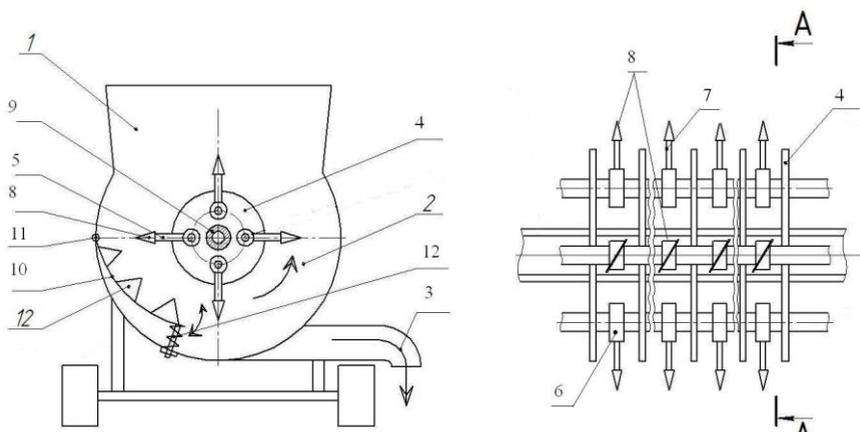
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлены актуальность исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований, основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** на основе исследования производственной деятельности животноводческих предприятий Краснодарского края дана классификация оборудования подготовки кормов к скармливанию, анализ подготовки кормов к скармливанию путем их измельчения, представлены технические средства для измельчения кормов, осуществлена оценка удельной энергоемкости этих машин. В соответствии с выше изложенным, сформулированы цель и задачи исследований.

Во **второй главе** изложены результаты теоретических исследований процесса измельчения стебельных кормов рабочим органом молотково-сегментного типа, получены аналитические зависимости модуля помола и энергоемкости процесса, получено обоснование конструктивно-технологической схемы измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа, проведено исследование энергозатрат измельчителя молотково-сегментного типа, определена скорость перемещения корма в камере измельчителя.

Анализ существующих технических средств по приготовлению стебельных кормов, предусматривающих применение серийно выпускаемой техники, позволил разработать измельчитель стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа (патент РФ на изобретение № 2639326).



1 - корпус, 2 – бункер, 3 - разгрузочным элементом, 4 - вращающийся диск, 5 - рабочие измельчающие органы, 6 - цилиндрическая втулка, 7 - шток, 8 - зубчатый режущий элемент, 9 - противорежущий орган, 10 - подпружиненная дека с противорежущими сегментами, 11 – шарнир, 12 - подпружиненная шпилька

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа (патент на изобретение РФ № 2639326)

Отличительной особенностью предлагаемого технического средства (рисунок 1) является рабочий орган молотково-сегментного типа, оснащенный режущим органом и противорежущими сегментами, которые измельчают корм поперечным и продольным сечением в зависимости от ориентации стеблей в бункере, а также с помощью подпружиненной шпильки осуществляется регулировка степени измельчения материала посредством изменения зазора между противорежущими сегментами. Это позволяет снизить энергоемкость процесса за счет поперечно-продольного резания и формированию усиленного воздушного потока в камере измельчителя и разгрузочном

эlemente; улучшить качество измельчения; повысить эксплуатационную надежность и срок службы.

На основе проведенного анализа процесса измельчения получены аналитические зависимости для теоретического обоснования конструктивных и технологических параметров измельчителя стебельных кормов. Основными факторами, от которых зависит энергоёмкость процесса измельчения кормов, являются: вид и влажность материала, скорость резания, угол скольжения, вид режущего сегмента и его расположение, геометрические параметры режущего сегмента, производительность и другие.

Мгновенная сила, приложенная очень короткое время к стебельному корму, имеет большие показатели, но импульс ее – величина конечная, а количество движения быстро меняется и выражается следующими формулами:

$$S = \int_0^{\Delta t} F dt = F \Delta t, \quad (1)$$

где F – средняя (за период удара) мгновенная сила, H .

Скорость соударения стеблей определяется согласно выражению:

$$v_c = v - \mu v = v (1 - \mu), \quad (2)$$

где v – скорость частицы до удара, м/с; μ – коэффициент, определяемый как отношение скорости слоя материала к линейной скорости режущих элементов; $\mu = 0,450 \div 0,467$.

$$E_1 = \frac{mv^2(1 - \mu)^2}{2} \quad (3)$$

где m – масса материала, кг

Энергия E_1 первой фазы процесса разрушения материала распределяется на работу упругих и пластических деформаций. Упругие деформации действуют на стебли разрушением, а энергия упругих деформаций E_2 определяется согласно выражению:

$$E_2 = \frac{mk^2v^2(1 - \mu)^2}{2} \quad (4)$$

Энергия пластических деформаций определяют изменение формы стеблей. Зависимость упругих и пластических деформаций определяется коэффициентом упругости материала k . Увеличение

коэффициента упругости материала определяет более эффективный процесс измельчения. Энергия, затрачиваемая на пластические деформации определяется выражением:

$$E_3 = E_1 - E_2 = \frac{mv^2(1 - \mu)^2(1 - k^2)}{2} \quad (5)$$

Вторая фаза процесса характеризуется изменением скорости движения корма, абсолютную величину которого v_a определяют выражением 6:

Введем новые обозначения: $v_1 = \mu v$; $v_2 = v$;

$$v_a = v_1 - (1 + k) \frac{m_1}{m + m_1} (v_1 - v_2) \quad (6)$$

где m_1 – масса режущего элемента, кг.

Учитывая, что корм имеет массу меньшую массы рабочих элементов, выражение 6 принимает вид:

$$v_a = \mu v - (1 + k)(\mu v - v) = v(k - k\mu + 1) \quad (7)$$

если $\mu = 0$, то

$$v_a = v(1 + k) \quad (8)$$

Выражение для определения расчета кинетической энергии корма после удара:

$$E'_4 = \frac{mv^2(k - k\mu + 1)^2}{2} \quad (9)$$

Энергия, полученная в результате удара, находится как разность энергий корма до удара и после, и определяется выражением:

$$E'_4 = \frac{mv^2}{2} [(k - k\mu + 1)^2 - \mu^2] \quad (10)$$

Полная энергия, которую корм получил при ударе, определяется выражением:

$$E = E_3 + E_4 = \frac{mv^2}{2} (1 - \mu)^2(1 + k^2) + \frac{mv^2}{2} [(k - k\mu + 1)^2 - \mu^2] \quad (11)$$

Условившись, что движением корма пренебрегаем из-за малой скорости, $\mu = 0$, а формула 11 имеет вид:

$$E = mv^2(1 + k) \quad (12)$$

Следовательно: полная энергия при ударе зависит от упругости материала k и коэффициента μ , являющегося отношением скорости материала к линейной скорости рабочих элементов.

Графически на рисунке 2 покажем изменение энергии, полученной материалом в результате удара.

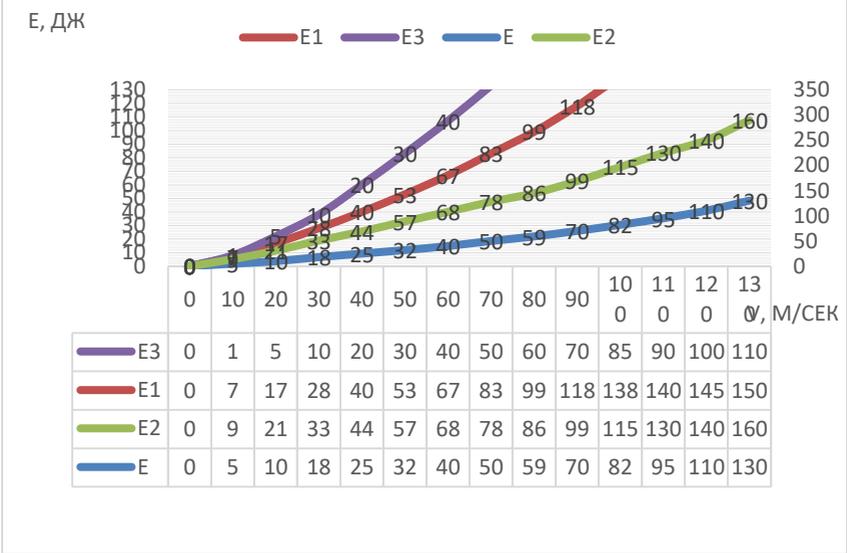


Рисунок 2 – График распределения энергии при ударе

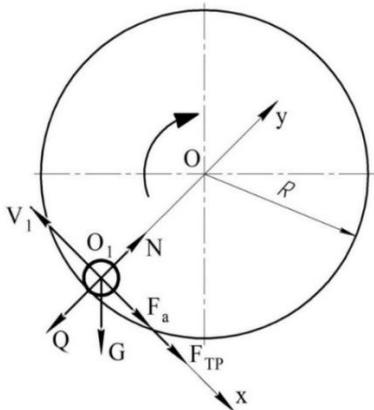
Исследуем движение частицы корма массой m в камере измельчителя. Начальная скорость частицы v , движение происходит по внутренней поверхности камеры, радиус которой R (рис. 3). Уравнения движения частицы корма в измельчающей камере:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = X \\ m \frac{d^2y}{dt^2} = Y \end{cases} \tag{13}$$

После ряда преобразований

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt}, Y=0 \text{ и } v_x = v_m,$$

где v_m – скорость движения частицы



R – радиус измельчающего рабочего органа, m , x и y – проекции на координатные оси равнодействующей всех приложенных к частице сил; $F_{тр}$ – сила трения; F_a – сила аэродинамического сопротивления; Q – центробежная сила; N – мощность;

Рисунок 3 – Схема сил, действующих на частицу корма в камере измельчения

получим дифференциальное уравнение в виде:

$$m \frac{dv_m}{dt} = X \quad (14)$$

При этом

$$X = F_{тр} + F_a, \quad (15)$$

где $F_{тр}$ – сила трения; F_a – сила аэродинамического сопротивления;

После подстановок уравнение (14) примет вид:

$$-\frac{dv_m}{dt} = (a + b)v_m^2 \quad (16)$$

где $a = \frac{f}{R_k}, \quad b = \frac{cF\gamma\beta}{2gm}$

После преобразований получим выражение:

$$v_m = \frac{v_0}{1 + \left(\frac{f}{R_k} + \frac{cF\gamma\beta}{2gm}\right)tv_0} \quad (17)$$

где v_0 – начальная скорость; R_k – радиус дробильной камеры; f – коэффициент трения; $\gamma\beta$ – удельный вес воздуха; c – коэффициент, зависящий от формы частицы и являющийся функцией числа Рейнольдса (Re); F – проекция частицы на плоскость, перпендикулярную направлению её движения.

Из формулы (17) видно, что при прочих равных условиях скорость перемещения единичной частицы снижается с уменьшением диаметра дробильной камеры. А так как эффект удара зависит от квадрата скорости соударения, то, следовательно, чем меньше d , тем эффективнее разрушение материала в дробильной камере. Помимо этого, с уменьшением диаметра дробильной камеры сокращается путь перемещения частиц по её рабочей поверхности, что приводит к снижению содержания в измельченном материале мелких пылевидных фракций.

В третьей главе представлены методика и результаты экспериментальных исследований процесса измельчения стебельных кормов, внешний вид измельчителя для проведения экспериментов (рисунки 4, 5), его описание и методы обработки эксперимента. Приводятся итоги исследований влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя стебельных кормов по модулю помола и энергоёмкости. Проведен ряд многофакторных экспериментов с целью экспериментального обоснования конструктивно-технологических параметров измельчителя стебельных кормов.

Привод измельчающего рабочего органа молотково-сегментного типа осуществляется от двигателя SEg80-2D (АИРЕ80С2).



Рисунок 4 – Внешний вид экспериментальной установки измельчителя с рабочим органом молотково-сегментного типа



Рисунок 5 - Внешний вид электропривода измельчающего рабочего органа



Рисунок 6 – Внешний вид измельчающего рабочего органа



Рисунок 7 – Внешний вид сепарирующего решета

Для снятия энергетических характеристик использовался комплект измерительный К505. Проведение экспериментальных работ по измельчению сена проводили меняя частоту вращения электрического двигателя (500-3000 об./мин).

Для изменения гранулометрического состава использовали сепарирующие решета (рисунок 6) с диаметром отверстий 0,5; 1,0; 1,5 см. Измельченный корм для контроля гранулометрического состава разбирался на отдельные порции до 20 мм на решетном классификаторе, а стебли длиной более 20 мм отбирались вручную, а затем каждая порция взвешивалась на весах AND GX-4000

В качестве критериев оптимизации были выбраны модуль помола - M (отклик Y_1) и энергоемкость- N (отклик Y_2). Факторами, влияющими на технологический процесс являются: X_1 – линейная скорость молотков (v), м/с; X_2 – влажность материала (W), %; X_3 – диаметр отверстий сепарирующего решета (d), мм; X_4 - число рядов молотков (n).

Для осуществления подтверждения оценки влияния факторов на процесс по данным эксперимента были получены уравнения регрессии:

$$M = -10,07806667 - 0,02 v + 3,4365 W + 0,073 d - 0,2 n + 0,0015 v W - 0,0001 v d + 0,0001 v n + 0,009 W d + 0,0045 W n - 0,001 d n - 0,12W^2 - 0,0024 d^2 + 0,0137 n^2$$

$$N = 5,466 - 0,0035 v - 1,29 W - 0,123 d - 0,038 n - 0,0026 v W - 0,0001 v n - 0,0034 W d + 0,0025 W n - 0,0003 d n + 0,05 W^2 + 0,011 d^2 + 0,0058 n^2$$

Для проведения эксперимента был выбран план Плакетта-Бермана. Получены координаты оптимума и построены поверхности отклика, а также решена компромиссная задача между двумя основными критериями оптимизации: модулем помола и энергоемкостью.

Анализ сечений поверхностей, представленных на рисунках 8 – 17, показывает, что оптимальная удельная энергоемкость N составляет $0,475 \text{ кВ}\cdot\text{ч/кг}$ при линейной скорости молотков $v = 100 \text{ м/с}$ и влажности материала $W = 13,8 \%$, диаметр отверстий сепарирующего решета d варьируется в пределах от 4 см до 5 см.

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением линейной скорости молотков с 60 м/с до 120 м/с энергия на измельчение материала увеличивается с 67 Дж до 135 Дж . Рисунок 18 Зависимости, построенные по предложенной формуле хорошо согласуются с экспериментальными. Расхождение результатов не превышает $4,5 - 6 \%$ в зависимости от влияющего фактора. Сходимость результатов по критерию Фишера составила $95,5\%$.

Использование измельчителя стебельных кормов в сравнении с КР-02, позволяет снизить удельные энергозатраты на $29,5 \%$, при сроке окупаемости дополнительных капитальных вложений $0,6$ года.

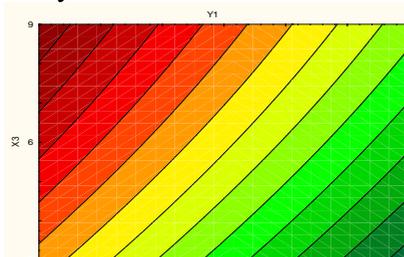


Рисунок 8 – Сечение поверхности модуля помола на плоскость X_2 и X_4

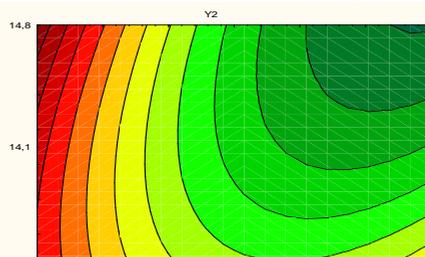


Рисунок 9 – Сечение поверхности энергоемкости на плоскость X_3 и X_4

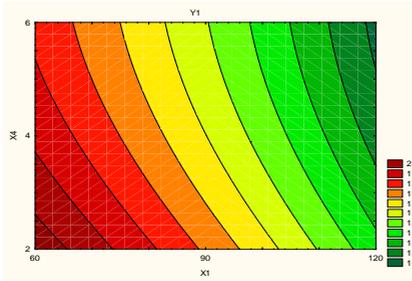


Рисунок 10 – Сечение поверхности модуля помола на плоскость X_2 и X_3

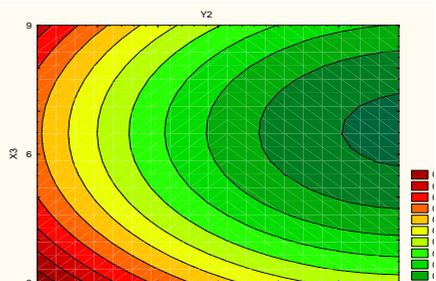


Рисунок 11 – Сечение поверхности энергоёмкости на плоскость X_2 и X_4

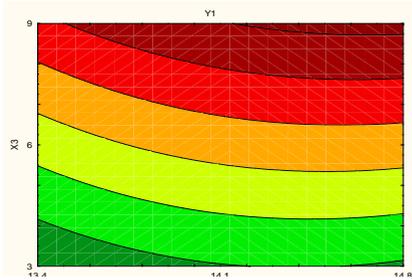


Рисунок 12 – Сечение поверхности модуля помола на плоскость X_1 и X_4

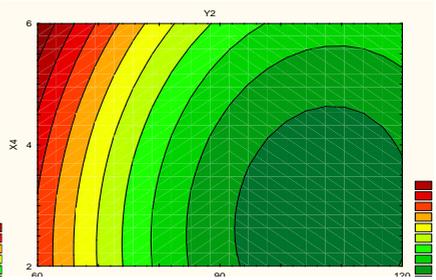


Рисунок 13 – Сечение поверхности энергоёмкости на плоскость X_2 и X_3

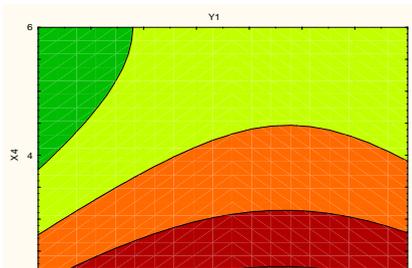


Рисунок 14 – Сечение поверхности модуля помола на плоскость X_1 и X_3

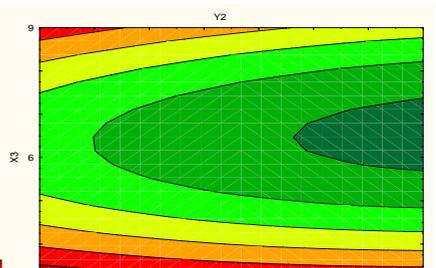


Рисунок 15 – Сечение поверхности энергоёмкости на плоскость X_1 и X_4

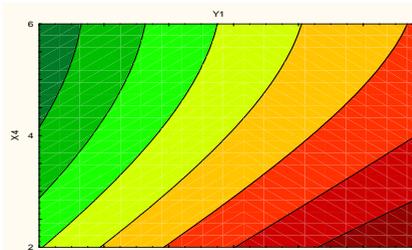


Рисунок 16 – Сечение поверхности модуля помола на плоскость X_1 и X_2

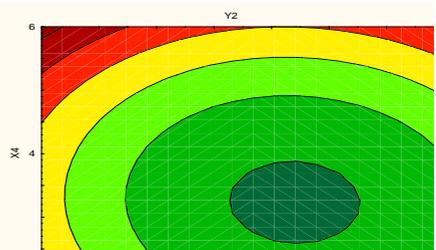


Рисунок 17 – Сечение поверхности энергоёмкости на плоскость X_1 и X_3

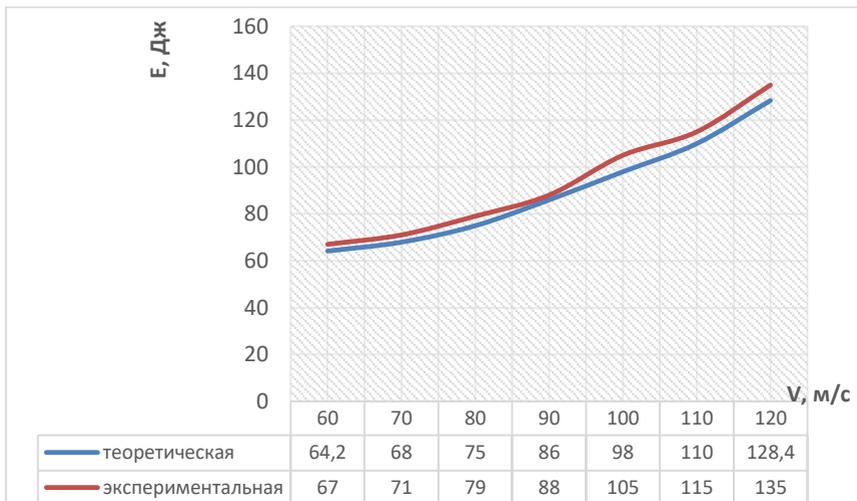


Рисунок 18 – Влияние линейной скорости молотков на затраты полной энергии для измельчения материала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. На основании проведенного анализа тенденций развития технических средств измельчения стебельных кормов, применимых в хозяйствах малых форм собственности, усовершенствована классификация измельчителей кормов, которая позволила наметить перспективные направления в разработке конструктивно-технологической схемы измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа. Новизна технических решений подтверждена патентом РФ на изобретение № 2639326.

2. В результате проведенного теоретического анализа технологического процесса измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа определены аналитические выражения, которые позволили определить конструктивно-технологические параметры измельчителя стебельных кормов, влияющие на энергоемкость: линейную скорость молотков (v), диаметр барабана (b), с учетом массы подаваемого материала (m) и коэффициентом упругости корма (k), число рядов молотков (n).

3. Теоретическими исследованиями установлены рациональные конструктивно-технологические параметры измельчителя сте-

белых кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа: линейную скорость молотков $v =$ от 100 м/с, влажность материала $W = 14$ %; диаметр отверстий сепарирующего решета $d = 1,5$ см; число рядов молотков $n = 4$., диаметр барабана $b = 0,3$ м, коэффициентом упругости корма $k = 0,07$, постоянный коэффициент работы, затрачиваемой на образование новых поверхностей при измельчении 1 кг материала $C = 0,23$ Удельная энергоёмкость технологического процесса составляет от 0,425 до 0,475 кВт·ч/кг.

4. В результате экспериментальных исследований процесса измельчения стебельных кормов измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа определено, что основными факторами, влияющим на удельную энергоёмкость и модуль помола, являются линейная скорость молотков v ; влажность материала W ; диаметр отверстий сепарирующего решета d ; число рядов молотков n .

Рациональными конструктивно-технологическими параметрами при которых удельная энергоёмкость составляет от 0,425 до 0,475 кВт·ч/кг, а модуль помола 1,3 мм являются: линейная скорость молотков $v = 95 - 115$ м/с; влажность материала $W = 14$ %; диаметр отверстий сепарирующего решета $d = 1,5$ мм; число рядов молотков $n = 4$.

Сходимость теоретических и экспериментальных результатов составляет 94-95,5 %.

5. Реализация предлагаемого измельчителя стебельных кормов в прессованном виде в сравнении с существующим КР-02 позволяет снизить удельные энергозатраты на 29,5 % и получить годовой экономический эффект в сумме 34000 рублей. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составляет 0,6 год.

Рекомендации производству

Предложенная в работе конструктивно-технологическая схема измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа, а также параметры его рабочих органов могут быть использованы конструкторскими организациями при разработке технических средств для механизации животноводства в условиях МФХ.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Перспективным направлением совершенствования измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа является перевод его на мобильную основу, с разработкой в нем устройств для самозагрузки материала в бункер измельчителя и регулировки длины фракций измельченного материала.

Основные положения диссертации опубликованы

– в международных наукометрических базах данных:

1. Theoretical aspects of the process grinding stalk feed chopper with a disk working body / M.I. Tumanova, V. Yu. Frolov, D.P. Sysoev, N. Yu. Morozova // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2019. – Vol. 6, № 6. – P. 13440.

2. Increasing efficiency of process of stem feed grinding by working tool of hammer-segment type / V.Yu. Frolov, N. Sarbatova, V. Kuznetsov, N. Strigunova // E3S Web of Conferences 273(3):07035. – DOI : 10.1051/e3sconf/202127307035

– в изданиях, рекомендованных ВАК:

3. Теоретические аспекты процесса измельчения кормов рабочим органом молотково-сегментного типа / В.Ю. Фролов, В.И. Кузнецов, Н.Ю. Морозова, А.В. Виноградов // Сельский механизатор. – 2019. – № 6. – С. 22–23.

4. Оптимизация параметров измельчителя стебельных кормов с рабочим органом молотково-сегментного типа / В.И. Кузнецов, Н.Ю. Морозова, С.П. Фаршанев, В.Ю. Фролов // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 10. – С. 49–61.

5. Тимофеев, М.Н. Анализ технических средств для измельчения кормов и их классификация / М.Н. Тимофеев, В.Ю. Фролов, Н.Ю. Морозова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 399–424.

– в прочих изданиях:

6. Морозова, Н.Ю. Применение кормораздатчика «ПИСК-12» на молочной ферме / Н.Ю. Морозова, А.В. Белик // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. ст. по материалам 71-й науч.-практ. конф. студентов по итогам НИР за 2015 год. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – С. 190–193.

7. Морозова, Н.Ю. Технологический процесс раздачи кормов / Н.Ю. Морозова, М.Д. Гаврилов // Новая наука: Стратегии и векторы развития. – 2016. – № 5–2 (82) . – С. 162–164.
8. Морозова, Н.Ю. Оборудование измельчения грубых кормов / Н.Ю. Морозова, Д.П. Сысоев, А.С. Касимов // Новая наука: опыт, традиции, инновации. – 2016. – № 6–1 (89). – С. 20–23.
9. Морозова, Н.Ю. Обзор патентов средств раздачи кормов на фермах / Н.Ю. Морозова, А.В. Белик // Новая наука: опыт, традиции, инновации. – 2016. – № 6–1 (89). – С. 41–43.
10. Морозова, Н.Ю. К вопросу обоснования конструктивно-режимных параметров рабочего органа молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев // Инновационные энерго-ресурсосберегающие технологии и техника 21 века : материалы Всеросс. молодежной науч. конф. – 2017. – С. 103–105.
11. Морозова, Н.Ю. Обоснование технологического процесса кормораздатчика-измельчителя стебельных кормов молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. ст. по материалам 72-й науч.-практ. конф. студентов по итогам НИР за 2016 год. – 2017. – С. 208–210.
12. Морозова, Н.Ю. Измельчитель стебельных кормов молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. ст. по материалам XI Всерос. конф. молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ и 80-летию со дня образования Краснодарского края. – 2017. – С. 412–413.
13. Морозова, Н.Ю. Классификация молотковых дробилок / Н.Ю. Морозова, Е.Н. Хижняков, В.Ю. Фролов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. ст. по материалам X Всерос. конф. молодых ученых, посвященной 120-летию И.С. Косенко. – 2017. – С. 596–597.
14. Морозова, Н.Ю. Инновационная техника для раздачи кормов / Н.Ю. Морозова, Р.В. Ботошан, А.В. Военушкин // Новая наука: техника и технологии. – 2017. – № 3. – С. 37 – 39.
15. Морозова, Н.Ю. Обоснование технологического процесса измельчения стебельных кормов рабочим органом молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Инновационные

технологии отечественной селекции и семеноводства : сб. тез. по материалам II науч.-практ. конф. молодых ученых Всерос. форума по селекции и семеноводству. – 2018. – С. 138–140.

16. Морозова, Н.Ю. Анализ факторов, влияющих на процесс измельчения стебельных кормов рабочим органом молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. ст. по материалам 73-й науч.-практ. конф. студентов по итогам НИР за 2017 год. – 2018. – С. 389–391.

17. Морозова, Н.Ю. Оптимизация конструктивно-режимных параметров измельчителя стебельных кормов молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов : сб. тез. по материалам Междунар. конф. – 2018. – С. 69.

18. Морозова, Н.Ю. Раздатчик-измельчитель грубых кормов / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Научно-технологическое обеспечение агропромышленного комплекса России: проблемы и решения. – 2018. – С. 74.

19. Морозова, Н.Ю. К вопросу снижения энергоемкости раздатчика-измельчителя при подготовке стебельных кормов к скармливанию / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Научно-технологическое обеспечение агропромышленного комплекса России: проблемы и решения. – 2018. – С. 76.

20. Морозова, Н.Ю. Обоснование технологического процесса измельчения стебельных кормов рабочим органом молотково-сегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 149–151.

21. Морозова, Н.Ю. К вопросу механизации технологического процесса приготовления кормов на предприятиях малых форм хозяйствования / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Эффективное животноводство. – 2019. № 3 (151). – С. 62–63.

– **патенты:**

22. Пат. 2639326 Российская Федерация МПК А01F 29/00 Кормораздатчик-измельчитель [Текст] / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, Н.Д. Морозова, Н.Ю. Морозова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – № 2017105954/17; заявл. 21.02.2017; опуб. 21.12.2017, Бюл. № 36.

Подписано к печати _____ 2022 г. Формат 60×84 ¹/₁₆
Бумага офсетная Офсетная печать
Печ. л. 1 Заказ № _____
Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Кубанского ГАУ
350044, Краснодар, ул. Калинина, 13.