



Габачиев Джамалдин Тамирланович

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГРУБЫХ ТОЛСТОСТЕБЕЛЬНЫХ КОРМОВ
ДЛЯ КРЕСТЬЯНСКИХ (ФЕРМЕРСКИХ) ХОЗЯЙСТВ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нальчик – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет
имени В.М. Кокова» (ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ)

Научный руководитель: **Шекихачев Юрий Ахметханович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Кабардино-Балкарский государственный аграрный
университет имени В.М. Кокова», кафедра «Техни-
ческая механика и физика», профессор

Официальные оппоненты: **Фролов Владимир Юрьевич**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Кубанский государственный аграрный университет
им. И.Т. Трубилина», кафедра «Механизация живот-
новодства и безопасность жизнедеятельности», заве-
дующий кафедрой
Глобин Андрей Николаевич
доктор технических наук, доцент, Азово-Черномор-
ский инженерный институт - филиал ФГБОУ ВО
«Донской государственный аграрный университет» в
г. Зернограде, кафедра «Технологии и средства меха-
низации АПК», профессор

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный
аграрный университет» (г. Троицк)**

Защита состоится «05» декабря 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.015.02 при ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, корп. 1, каб. 17, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» <http://kbgau.ru/>.

Автореферат разослан «__»_____ 2025 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://minobrnauki.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» <http://kbgau.ru/>.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Фиापшев
Амур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из приоритетных направлений «Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия до 2025 г.» определено развитие малых форм хозяйствования.

В результате реализации данной программы в Кабардино-Балкарской Республике (КБР) организованы более 3 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств, в том числе свыше 800 семейных животноводческих ферм, что позволило увеличить урожайность сельхозкультур и поголовье сельскохозяйственных животных.

При этом семейные фермы и крестьянские (фермерские) хозяйства столкнулись с проблемой выбора машин, позволяющих измельчать грубые корма, при минимальных энергозатратах.

Для приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования отечественные производители сельхозтехники предлагают измельчители, предназначенные в основном для измельчения стеблей злаковых культур: сена, соломы и трав. Основным их недостатком является высокая удельная энергоемкость процесса измельчения. Для измельчения толстостебельных грубых кормов на рынке представлены измельчители китайского производства, которые имеют сложную конструкцию и высокую удельную энергоемкость.

В связи с этим разработка новой конструктивно-технологической схемы измельчителя для семейных ферм и крестьянских (фермерских) хозяйств, позволяющей измельчать толстостебельные грубые корма при минимальных энергозатратах, является актуальной.

Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ в рамках государственной «Программы фундаментальных и приоритетных прикладных исследований по научному обеспечению развития АПК РФ до 2025 г.».

Степень разработанности темы. Большой вклад в разработку и совершенствование теории измельчения грубых кормов и технических средств внесли В. П. Горячкин, В. А. Желиговский, О. Г. Ангилеев, Г. И. Бремер, В. Ю. Фролов, А. В. Бурмага, А. Н. Глобин, А. Р. Демидов, В. Л. Кирпичев, А. М. Кукта, М. Ф. Кулик, Л. Б. Левинсон, Г. Г. Маслов, С. В. Мельников, Н. Е. Резник, Н. С. Сергеев, В. И. Сыроватка, Е. И. Трубилин, и другие.

Разработкой измельчителей грубых кормов для крестьянских (фермерских) хозяйств в разное время занимались В. Р. Алешкин, А. Ф. Башков, Д. И. Грицай, А. В. Рамзаев, Н. Ю. Сарбатова, Д. П. Сысоев, М. И. Туманова и другие.

Данная работа дополняет эти исследования путем обоснования параметров и режима работы измельчителя, позволяющего измельчать толстостебельные грубые корма с минимальными энергозатратами.

Рабочая гипотеза – повысить качество измельчения грубых толстостебельных кормов и снизить энергоемкость измельчения возможно за счет использования двух параллельно расположенных валов, на цилиндрической поверхности которых по всей длине выточены ножи, выполненные в виде зубьев, входящие в зацепление с друг другом и вращающиеся в разные стороны, с разными угловыми скоростями.

Цель работы – обоснование параметров и режимов работы измельчителя грубых толстостебельных кормов для снижения энергоемкости процесса измельчения.

Объекты исследования – технологический процесс измельчения грубых толстостебельных кормов и опытный образец измельчителя.

Предмет исследования – закономерности, связывающие геометрические параметры и кинематический режим работы измельчителя толстостебельных кормов с показателями удельной энергоемкости.

Задачи исследования.

1. Провести конструктивно-технологический анализ измельчителей грубых толстостебельных кормов с обоснованием перспективного направления их совершенствования.

2. Разработать конструктивно-технологическую схему измельчителя, позволяющую измельчать грубые толстостебельные корма при минимальных энергетических затратах.

3. Провести теоретические исследования рабочего процесса измельчителя грубых толстостебельных кормов и определить факторы, влияющие на производительность и энергоемкость измельчения.

4. Разработать опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов.

5. Оптимизировать конструктивно-режимные параметры измельчителя по критерию энергоемкости.

6. Оценить экономическую эффективность использования предлагаемого измельчителя грубых толстостебельных кормов.

Научную новизну работы составляют:

- аналитические зависимости, позволяющие установить: силы, действующие на измельчаемый материал; работу и мощность, затрачиваемые на процесс резания; производительность и степень измельчения грубых толстостебельных кормов; взаимосвязь между физико-механическими характеристиками грубых толстостебельных кормов и основными конструктивно-режимными параметрами измельчителя, а также пределы изменения этих параметров, оказывающие наибольшее влияние на энергоемкость измельчения;

- регрессионные зависимости энергоемкости измельчителя грубых толстостебельных кормов от геометрических параметров и режимов работы.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическую значимость работы представляют: аналитические зависимости работы измельчителя грубых толстостебельных кормов, позволяющие обосновать основные кинематические и геометрические параметры измельчителя; методика инженерного расчета основных параметров измельчителя; регрессионные зависимости энергоемкости измельчителя грубых толстостебельных кормов от геометрических параметров и режимов работы, позволяющее обосновать его основные геометрические, кинематические параметры и режим работы.

Практическую значимость работы представляют: конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов, которая позволяет разработать техническое решение конструкции измельчителя, позволяющего измельчать

грубые толстостебельные корма при минимальных энергетических затратах; опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов; соотношение между параметрами и режимами работы измельчителя с показателями производительности и энергоемкости, обеспечивающее рациональный процесс измельчения грубых толстостебельных кормов.

Техническая новизна предложенного конструктивного решения подтверждена патентом РФ № 168572 на полезную модель.

Методы исследований. Теоретические исследования проведены с использованием основных положений высшей математики и теоретической механики. Экспериментальные исследования проведены с использованием теории планирования многофакторного эксперимента. Опыты проведены в лабораторных условиях с использованием апробированных методик. Опытные данные обрабатывались с использованием пакета программ MathCad 7 и Microsoft Excel 2010.

Основные положения, выносимые на защиту:

- конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов, включающая две параллельно расположенные валы, на цилиндрической поверхности которых по всей длине выточены ножи, выполненные в виде зубьев, входящие в зацепление с друг другом и вращающиеся в разные стороны с разными угловыми скоростями;

- аналитические зависимости, описывающие процесс работы измельчителя грубых толстостебельных кормов, позволяющие обосновать основные конструктивно-режимные параметры измельчителя;

- результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров и режима работы измельчителя грубых толстостебельных кормов.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований приняты К(Ф)Х «Апеков Алим Нарикович» (с.п. Анзорей, Лескенский район, КБР), К(Ф)Х «Инжижоков Заурби Муаедович» (с.п. Аргудан, Лескенский район, КБР) для практического применения.

Степень достоверности и апробация работы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: результаты получены с применением известных методик проведения исследований, современной измерительной и вычислительной техники; установлено качественное и количественное совпадение теоретических и экспериментальных данных с результатами, представленными в независимых источниках.

Основные положения работы доложены и обсуждены на: Международной НПК «Энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2022 г.); X Международной НПК «Реализация приоритетных программ развития АПК» (г. Нальчик, 2022 г.); Всероссийской (национальной) НПК «Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства» (г. Нальчик, 2021 г.); VII Международной НПК «Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность» (г. Нальчик, 2021 г.); International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-

2019»; XII Международной НПК «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК», в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агро-универсал – 2016» (г. Ставрополь, 2016 г.).

Опытный образец измельчителя грубых кормов демонстрировался на: IX выставке инновационных проектов молодых ученых Северного Кавказа, посвященной дню Российской науки (г. Нальчик 2015 г.); 17-ой Международной выставке «Агро-универсал-2015» (г. Ставрополь, 2015 г.); Всероссийском конкурсе на лучшую научную работу студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений МСХ РФ (г. Нальчик, 2015 г.); выставке научно-технических и инновационных достижений III молодежного фестиваля науки (г. Ставрополь, 2015 г.); Всероссийском конкурсе фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «УМНИК» (г. Нальчик, 2015, 2016 гг.); X Выставке инновационных проектов молодых ученых Северного Кавказа, посвященная дню Российской науки (г. Нальчик, 2016 г.); Молодежном бизнес-форуме «Точка Роста. Места силы» (г. Нальчик, 2016 г.); Всероссийском конкурсе инновационных студенческих работ в области механизации (г. Москва, 2016 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 научных работах: 4 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ; 1 патент РФ на полезную модель; 7 статей в прочих изданиях. Общий объем опубликованных работ составил 4,88 п.л., из них личный вклад автора 3,91 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация содержит: введение, четыре раздела, заключение, список использованных источников и приложения. Работа изложена на 148 страницах, включая 57 рисунков, 23 таблицы и 11 приложений. Список использованных источников включает 144 наименования, в том числе 8 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены актуальность исследований, цель работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** «Состояние проблемы измельчения грубых толстостебельных кормов в крестьянских (фермерских) хозяйствах» рассмотрены способы и классификация технических средств механического измельчения грубых кормов, краткий анализ технических устройств для осуществления этого процесса.

Без предварительной подготовки сельскохозяйственным животным можно скармливать сено, отвечающее предъявляемым требованиям к его качеству. Предварительному измельчению в обязательном порядке подлежат грубые стебельные корма.

Установлено, что в процессе их переработки К(Ф)Х, ИП и личные хозяйства сталкиваются с проблемой выбора машины, позволяющего измельчать толстостебельные грубые корма: стебли, стержни и початки кукурузы, стебли и корзинки подсолнечника при минимальных энергозатратах.

Наиболее перспективными для семейных крестьянских (фермерских) хозяйств являются измельчители, передающие крутящий момент исполнительным механизмам посредством электрического привода. Следовательно, снизить энергоемкость из-

мельчения возможно за счет использования машин со следующими характеристиками: привод электрический; принудительная подача материала к двум параллельно расположенным валам с ножами, обеспечивающими скользящее резание.

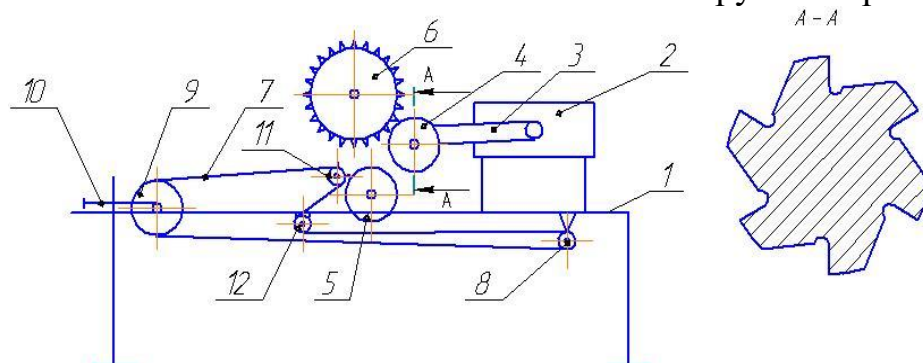
Анализ технических характеристик измельчителей, предлагаемых для использования в личных подсобных и крестьянских (фермерских) хозяйствах показал, что они имеют высокую удельную энергоемкость измельчения сена и соломы. Совершенствование конструкции измельчителей грубых толстостебельных кормов должно идти по пути совмещения процесса плющения и скользящего резания, что даст возможность упростить их конструкцию, повысить производительность и уменьшить энергоемкость процесса измельчения. При этом подача исходного материала должен осуществляться не вручную, а принудительно, за счет прутковых или ленточных транспортеров.

Применение прицепных и навесных измельчителей грубых кормов в семейных крестьянских (фермерских) хозяйствах ограничено в связи с их высокой удельной энергоемкостью процесса измельчения. Совершенствование конструкции измельчителей грубых толстостебельных кормов должно идти по пути совмещения процесса плющения и скользящего резания, что даст возможность упростить их конструкцию, повысить производительность и уменьшить энергоемкость процесса измельчения. При этом подача исходного материала должен осуществляться не вручную, а принудительно, за счет прутковых или ленточных транспортеров. В связи с этим возникает необходимость разработки новой конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых толстостебельных кормов с возможностью их применения в К(Ф)Х и ИП.

Сформулированы цель работы и задачи исследования.

Во втором разделе «Теоретические исследования процесса измельчения грубых толстостебельных кормов» представлены результаты теоретических исследований по обоснованию основных параметров и режимов работы измельчителя.

С целью повышения эффективности использования измельчителей грубых кормов необходимо, чтобы они обеспечивали эффективное измельчение толстостебельных грубых кормов и обладали высокой пропускной способностью при малых энергетических затратах. Для решения указанной проблемы предлагается конструктивно-технологическая схема измельчителя толстостебельных грубых кормов (рисунок 1).



1 – рама; 2 – двигатель; 3 – механизм привода; 4 – подающий барабан; 5 – измельчительный барабан; 6 – вал с циркуляционными дисками; 7 – транспортер; 8, 9 – ведущий и ведомый валы транспортера; 10, 11, 12 – механизмы натяжения транспортера

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя грубых толстостебельных кормов

$$N_{OB} = N_{ИЗ} + N_{ХХ}. \quad (2)$$

Мощность, затрачиваемая на измельчение исходного материала, составит:

$$N_{ИЗ} = M_P \omega_{PO} = \Delta S q_{ВД} R_{ИБ} \omega_{PO} (\cos \tau + f' \sin \tau). \quad (3)$$

где $\Delta S = \frac{60S}{z_{HO} n_{PO} \cos \alpha}$, S – подача, м/с; z_{HO} – число ножей на рабочем органе, шт.; n_{PO} – число оборотов рабочего органа, мин⁻¹; $q_{ВД} = \frac{N}{\Delta S}$, $R_{ИБ}$ – радиус-вектор, м; τ – угол скольжения, град.

Выражение $q_{ВД} (\cos \tau + f' \sin \tau)$ представляет собой удельную работу резания (Дж/м²).

Значение $N_{ХХ}$ будет равно:

$$N_{ХХ} = \frac{m_{PO} g R_{ТВ} \pi n_{PO}}{30 g_{ОВ}^2 \eta_{ПР}}, \quad (4)$$

где m_{PO} – масса рабочего органа, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; $R_{ТВ}$ – радиус тела вала рабочего органа, м; $g_{ОВ} = 0,995$ – потери на трение в опорах вала; $\eta_{ПР} = 0,9$ – КПД привода.

Производительность измельчителя рассчитывается по зависимости (кг/ч) (рисунк 4):

$$Q_{ИЗ} = 3600 K_{ИМ} h_{ИМ} \ell_{ИБ} v_{ИМ} \rho_{ИМ}, \quad (5)$$

где $K_{ИМ}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность давления измельчаемого материала по всей поверхности измельчительного барабана (0,3-0,5); $h_{ИМ}$ – высота слоя измельчаемого материала, м; $\ell_{ИБ}$ – длина измельчительного барабана, м.

Энергоемкость измельчения рассчитывается по зависимости (рисунк 5):

$$\mathcal{E}_{ИЗ} = \lambda_{ИМ} \frac{N_{OB}}{Q_{ИЗ}}. \quad (6)$$

где $\lambda_{ИЗ} = 1,27 \frac{\sum_{i=1}^m S_{ИЗi} (b_H - 2\Delta b_H) \psi_{СТ}}{\sum_{j=1}^{z_{СТ}} \ell_j d_{СТ}^2}$, где $S_{ИЗi}$ – площадь поперечного сечения измельчаемого материала в плоскости рабочей зоны ножа, м; Δb_H – зазор между режущими и противорежущими ножами, м; $\psi_{СТ}$ – коэффициент, учитывающий степень плотности размещения стеблей в поперечном сечении $S_{ИЗi}$; ℓ_j – длина частиц измельченных стеблей, м; $d_{СТ}$ – усредненный диаметр стебля, м.

Анализ полученной зависимости показывает, что наиболее оптимальным диапазоном изменения угла скольжения является 30-40°. При этих значениях энергоемкость измельчения составляет 0,6-1,1 кВт·ч/т.

В момент схода с ножа измельчающего барабана на частицу измельченного материала будут действовать сила тяжести и сопротивления воздуха.

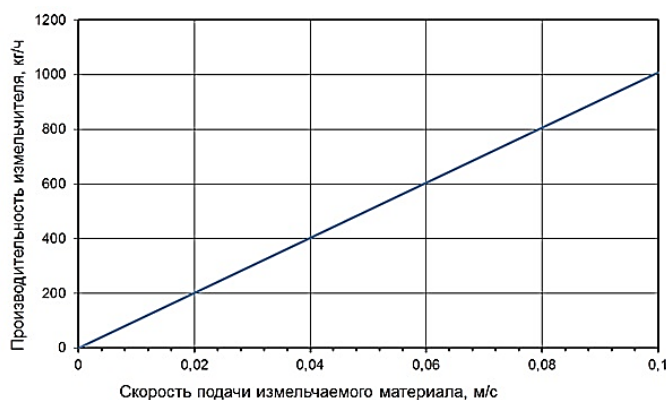


Рисунок 4 – Теоретическая зависимость производительности измельчителя от скорости подачи измельчаемого материала

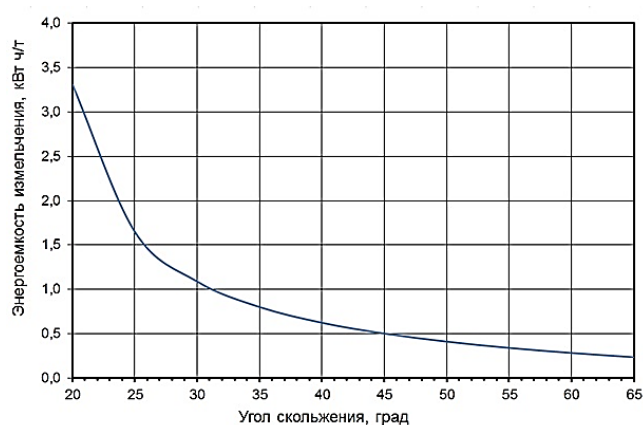


Рисунок 5 – Зависимость энергоемкости измельчения от угла скольжения

Дифференциальное уравнение полета частицы измельченного материала в направлении оси x , имеет вид:

$$\begin{cases} m_{ИМ} \ddot{x} = -R_B (\dot{x})^2 \\ m_{ИМ} \ddot{y} = -m_{ИМ} g - R_B (\dot{y})^2 \end{cases} \quad (7)$$

где R_B – сила сопротивления воздуха.

После некоторых преобразований, получим:

$$x = \frac{1}{k_{\Pi}} \ln(k_{\Pi} V_{ИБ} t + 1). \quad (8)$$

где k_{Π} – коэффициент парусности.

График, построенный на основании уравнения (8) при $H_{ИБ}=0,05$ м приведен на рисунке 6.

Таким образом, уравнение движения частицы измельченного материала в вертикальной плоскости имеет вид:

$$y = H_{ИБ} + \frac{1}{2k_{\Pi}} \ln(g + k_{\Pi} V_{ИБ}^2) - \frac{1}{2k_{\Pi}} \ln \left\{ g \left[1 + tg^2 \left(\arctg \sqrt{\frac{1}{g}} e^{2k_{\Pi} \left\{ H_{П} + \frac{1}{2k_{\Pi}} \ln(g + k_{\Pi} V_0^2) \right\}} - 1 - t \sqrt{k_{\Pi} g} \right) \right] \right\}. \quad (9)$$

С учетом того, что:

$$t = \frac{1}{k_{\Pi} V_0} (e^{x k_{\Pi}} - 1), \quad (10)$$

Окончательно получим:

$$y = H_p + \frac{1}{2k_{II}} \ln(g + k_{II} V_0^2) - \frac{1}{2k_{II}} \ln \left\{ g \left[1 + tg^2 \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{g}} e^{2k_{II} \left\{ H_p + \frac{1}{2k_{II}} \ln(g + k_{II} V_0^2) \right\}} - 1 - \frac{\sqrt{k_{II} g}}{k_{II} V_0} (e^{xk_{II}} - 1) \right) \right] \right\}. \quad (11)$$

График, построенный на основании уравнения (11) при $n = 2000$ об/мин и $H_{ИБ} = 0,5$ м приведен на рисунке 7.

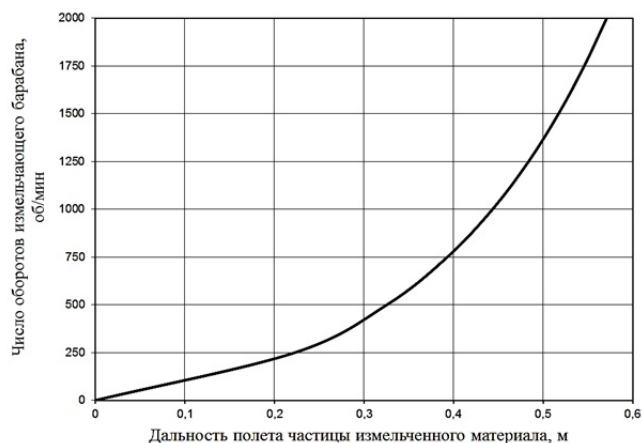


Рисунок 6 – Зависимость дальности полета частицы мульчи от числа оборотов измельчающего барабана

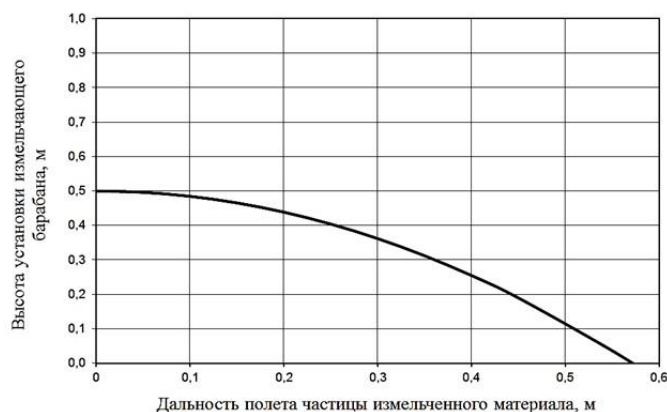


Рисунок 7 – Траектория полета частицы измельченного материала после схода с ножа измельчающего барабана

Проведенные теоретические исследования показали, что повышение эффективности измельчения грубых кормов возможно за счет использования в агрегате двух параллельных валов: основного и подающего, на цилиндрической поверхности которых по всей длине выточены шесть зубьев шириной 0,007 м и длиной 0,04 м, расположенные под углом 60° друг к другу и размещены с шагом 0,02 м. Зубья входят в зацепление друг с другом с зазором 0,003 м. Основной вал с режущими ножами вращается с частотой 2000-2011 мин^{-1} по часовой стрелке, а подающий вал с противорежущими ножами с частотой 80-90 мин^{-1} , обеспечивая качественные показатели измельчения, соответствующие зоотехническим требованиям.

В третьем разделе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» представлены программа, методика экспериментальных исследований и использованные измерительные средства.

Экспериментальные исследования процесса измельчения стеблей кукурузы проводились в крестьянских (фермерских) хозяйствах «Инжижиков Заурби Муаедович» (с.п. Аргудан, Лескенский район, КБР) и «Апеков Алим Нарикович» (с.п. Анзорей, Лескенский район, КБР) на экспериментально-опытной установке (рисунки 8, 9). Основным показателем процесса измельчения стеблей кукурузы в измельчителе считаем энергоемкость процесса измельчения, обеспечивающего заданный гранулометрический состав. Подбор используемого оборудования производился с учетом оценки их точности по значению максимально возможной статистической ошибки.



а)



б)

Рисунок 8 – Общий вид вала с циркуляционными дисками (а), основного вала с режущими ножами и подающего вала с противорежущими ножами (б)



а)



б)

а – клиноременная передача для привода основного вала с режущими ножами и ленточного транспортера; б – цепная передача для привода вала с циркуляционными дисками и подающего вала с противорежущими ножами

Рисунок 9 – Механизмы привода рабочих органов измельчителя

Эксперименты проведены с использованием однофазного коллекторного двигателя переменного тока типа JUICERCT-1206 ($N_H = 0,8 \text{ кВт}$; $U_H = 220 \text{ В}$; $n_H = 1500 \text{ об/мин}$; $I_H = 0,8 \text{ А}$).

Анализ факторов, влияющих на энергоемкость измельчения грубых кормов предлагаемым измельчителем, показал, что в наибольшей степени на эти показатели влияют: число оборотов режущих ножей (n_{PH} , мин^{-1}); межосевое расстояние между основным и подающим валами (S_H , м); скорость подачи исходного материала ($V_{им}$, м/с) (табл. 1).

Особенности работы измельчителя при измельчении толстостебельных культур, к которым относится кукуруза, обусловлены их физико-механическими свойствами. Большой диаметр стеблей кукурузы (40-60 мм) требует значительного усилия и времени на перерезание.

Таблица 1 – Основные факторы и уровни их варьирования

Факторы Значение	Число оборотов режущих ножей, мин ⁻¹			Межосевое расстояние между основным и подающим валами, м			Скорость подачи исходного материала, м/с		
Кодированное (безразмерное)	X_1			X_2			X_3		
	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
Натуральное	n_{PH} , мин ⁻¹			S_H , м			V_{HM} , м/с		
	1500	2000	2500	0,092	0,095	0,098	0,04	0,08	0,12

Следует подчеркнуть, что при создании расчетных моделей процесса резания необходимо учитывать стадии спелости обрабатываемого растительного материала и дискретность данного фактора. К примеру, стебли кукурузы срезаются исключительно при молочно-восковой спелости или при полной спелости зерна. Учитывая данное обстоятельство, при проведении исследований использовались стебли кукурузы в стадии полной спелости.

В результате проведенных исследований установлено, что коэффициент трения стеблей кукурузы зависит от их влажности, и при скольжении по резине изменяется в пределах 0,82-1,04. Угол трения стеблей кукурузы изменяется в пределах 39°-46°.

Анализ зависимости равномерности подачи измельчаемого материала от частоты вращения вала подающего транспортера (рисунок 10) показывает, что предлагаемая конструкция подающего транспортера обеспечивает требуемую равномерность потока измельчаемого материала к рабочим органам измельчителя в интервале частот вращения вала подающего транспортера 80-90 об/мин.

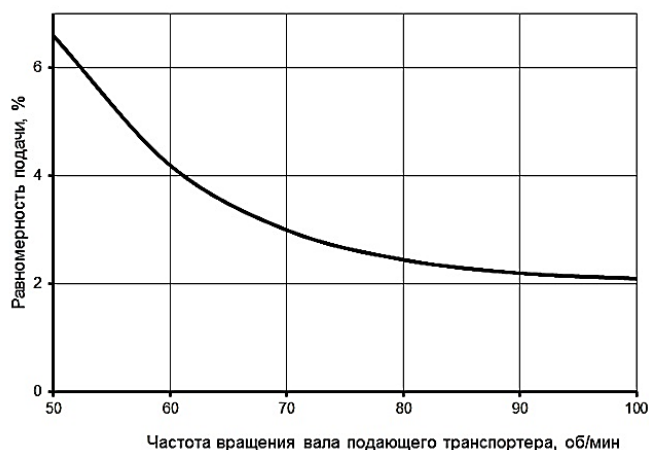


Рисунок 10 – Зависимость равномерности подачи измельчаемого материала от частоты вращения вала подающего транспортера (стебли кукурузы)

В результате теоретических исследований установлено, что производительность процесса резания возрастает до некоторого значения с увеличением числа оборотов, что объясняется ускорением процесса, а затем достаточно быстро снижается вследствие того, что рабочий орган не успевает захватить измельчаемый материал. При различной относительной влажности измельчаемого материала максимальное значение производительности имело место при числе оборотов 1500-2500 мин⁻¹.

Опыты были проведены для проверки полученных зависимостей. Обработка результатов сводилась к установлению

зависимости производительности установки (кг/ч) от числа оборотов основного вала (мин⁻¹) и влажности измельчаемого материала (%). Результаты исследования влияния числа оборотов основного вала с режущими ножами и относительной влажности исходного материала на производительность измельчителя представлены

на рисунке 11. Полученные результаты подтверждает наличие экстремума, т.е. возможно установление критического значения частоты вращения основного вала.

Видно, что рациональное значение числа оборотов основного вала находится в диапазоне 1850-2050 мин⁻¹. В этих пределах числа оборотов основного вала и находится максимум производительности в независимости от влажности обрабатываемого материала.

В указанных пределах рабочие органы оптимально функционируют, происходит эффективное расщепление продольных волокон перерезаемого слоя (процесс нормального резания), отрезаются частицы необходимых размерных фракций.

Анализ полученных результатов показывает, что относительная влажность также заметно влияет на производительность измельчительного устройства. Измельчению подвергался исходный материал, имеющий относительную влажность 10-40%. Для измельчения материала с такой влажностью рациональной является частота вращения основного вала, равная 2000 мин⁻¹.

Полученная зависимость производительности измельчителя от относительной влажности измельчаемого материала при различных значениях числа оборотов основного вала представлена на рисунке 12.

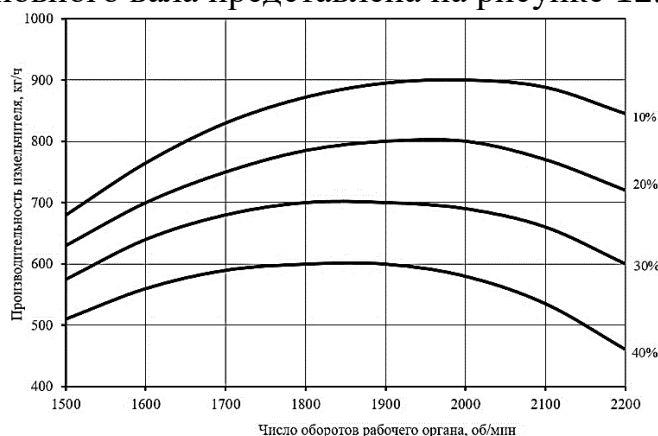


Рисунок 11 – Зависимость производительности измельчителя от числа оборотов основного вала для различных значений влажности стеблей кукурузы

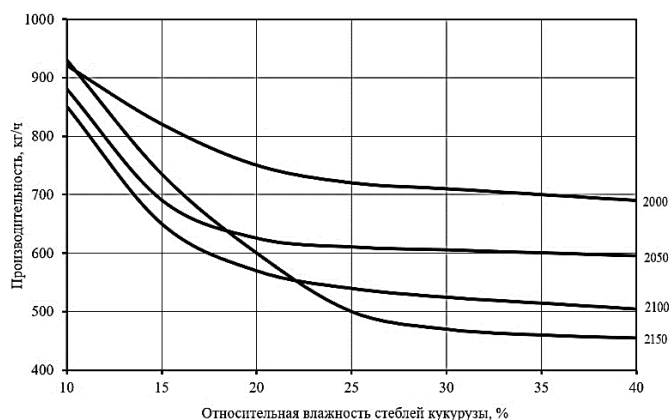


Рисунок 12 – Зависимость производительности измельчителя от относительной влажности обрабатываемого материала (стебли кукурузы) для различных значений числа оборотов основного вала

Таким образом, оптимизационные исследования следует проводить при базовом уровне частоты вращения основного вала, равном 2000 мин⁻¹. Эксперименты проведены с интервалом варьирования частоты вращения основного вала, равным ± 500 об/мин.

Для установления оптимальных конструктивно-режимных параметров измельчителя грубых толстостебельных кормов, при которых обеспечивается минимальная энергоёмкость измельчения, реализован многофакторный эксперимент.

Уравнение регрессии для функции отклика – «энергоёмкость измельчения», согласно проведенному многофакторному эксперименту вид:

- в кодированной форме:

$$Y_{\text{Эиз}} = 1,6933 + 0,3888X_1 - 0,9963X_2 - 2,225X_3 + 0,165X_1X_2 + 0,143X_1X_3 + 0,0925X_2X_3 + 4,3084X_1^2 + 3,3584X_2^2 + 4,3809X_3^2 \quad (5)$$

- в натуральной форме:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{из} = & 3518,223 - 0,0792n_{PH} - 7151,33S_H - 581,19V_{ИМ} + 0,11n_{PH}S_H + \\ & + 0,007125n_{PH}V_{ИМ} + 770,833S_HV_{ИМ} + 0,000017n_{PH}^2 + 37315,6S_H^2 + 2738,06V_{ИМ}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Установлено, что полученное уравнение регрессии адекватно описывает исследуемый процесс ($F_{расч} = 1,953 < F_{расч} = 2,288$).

Построены поверхности отклика зависимости энергоемкости измельчения от парного влияния основных факторов (рис. 13).

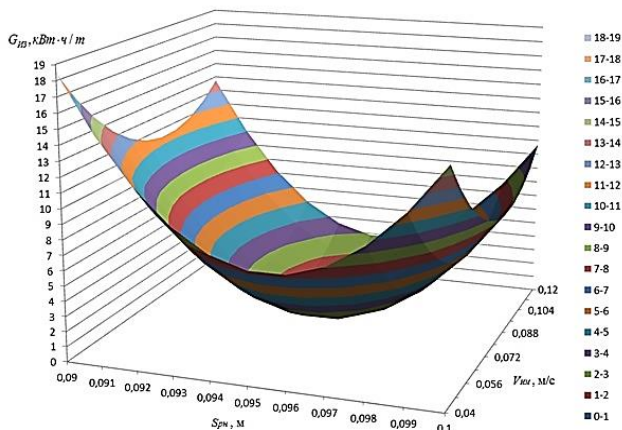


Рисунок 13 – Поверхность отклика зависимости энергоемкости измельчения от зазора между режущими и противорежущими ножами S_H и скорости подачи исходного материала $V_{ИМ}$

Анализ полученных результатов показывал, что скорость подачи исходного материала оказывает наибольшее влияние на энергоемкость измельчения, а число оборотов режущих ножей, зазор между режущими и противорежущими ножами практически одинаково влияют на нее.

Минимум энергоемкости измельчения (1,33 кВт·ч/т) обеспечивается при частоте оборотов режущих ножей $n_{PH} = 1974 \text{ мин}^{-1}$, зазоре между режущими и противорежущими ножами $S_H = 0,095 \text{ м}$ и скоростью подачи исходного материала $V_{ИМ} = 0,09 \text{ м/с}$.

При определении механической характеристики механизма привода измельчителя учитываем, что запуск установки осуществляется на холостом ходу с последующим загрузкой механизма подачи – ленточного транспортера и рабочего органа. Мощность двигателя измельчителя тратится на мощности: $P_{ИЗМ}$ – мощность измельчения; $P_{ПОД}$ – мощность механизма подачи; $P_{ХХ}$ – мощность холостого хода машины. Причем соблюдается соотношение: $P_{ИЗМ} : P_{ПОД} : P_{ХХ} = 3 : 1 : 1$.

Расчет эквивалентной мощности $P_{ЭКВ}$ проводим для участка полной нагрузки. Получено, что $P_{ЭКВ} = 3,86 \text{ кВт}$.

Высокопроизводительным, надежным и экономически выгодным может считаться только такой производственный агрегат, у которого приводной электродвигатель имеет электромеханические свойства, соответствующие характеристикам и технологическим требованиям рабочей машины. Важнейшими признаками двигателя рабочих машин являются их механические характеристики.

Механическая характеристика механизма привода измельчителя описывается эмпирической формулой:

$$M_C = M_0 + (M_{С.Н} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^x, \quad (14)$$

где M_C – момент сопротивления при угловой скорости ω , Н·м; $M_{C.H}$ – момент сопротивления при угловой скорости ω_H , Н·м; X – показатель степени для измельчителей, характеризующий изменение статического момента при изменении угловой скорости; M_0 – момент сопротивления трения движущихся частиц (не зависит от скорости), Н·м; ω – текущие значения угловой скорости, с^{-1} ; ω_H – номинальная угловая скорость рабочего органа, с^{-1} .

Результаты расчета сведены в таблицу 2 и представлены на рисунке 14.

Таблица 2 – Результаты расчета механической характеристики

ω	0	30	60	90	120	150	180	209
M_0	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
$M_{C.H}$	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97	5,97
ω_H	209	209	209	209	209	209	209	209
X	2	2	2	2	2	2	2	2
M_C	1,79	1,88	2,14	2,57	3,17	3,94	4,89	5,97

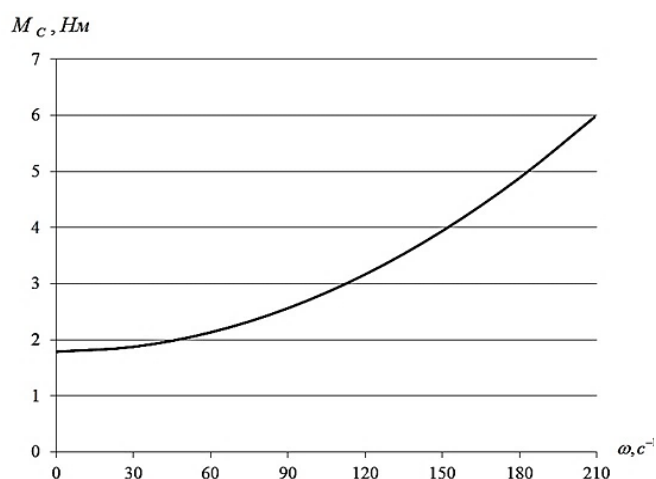


Рисунок 14 – Механическая характеристика электропривода измельчителя

Выбран электродвигатель серии АИМ112М4: асинхронный трехфазный двигатель серии АИМ общего назначения, с высотой оси вращения 112 мм, длинной станиной, с количеством полюсов – 4, УП – пылезащищенный, У2,5 – климатическое исполнение; степень защиты – IP54; конструктивное исполнение по способу монтажа – IM1081; исполнение по взрывозащите – СС0470 II2GExdIIBT4.

В четвертом разделе «Экономическая эффективность использования измельчителя грубых толстостебельных кормов» приведен расчет экономиче-

ской эффективности использования предлагаемого измельчителя в сравнении с измельчителем грубых кормов ИРР-1 со следующими характеристиками: производительность – до 800 кг/ч; мощность электродвигателя – 25 кВт; стоимость – 340 тыс. руб. Характеристики предлагаемого измельчителя: производительность – 700-900 кг/ч; мощность электродвигателя – 5,5 кВт.

Расчеты показали, что: эксплуатационные затраты на измельчение стеблей и початков кукурузы снижаются с 535,7 тыс. руб. до 295,5 тыс. руб., т.е. на 240,2 тыс. руб. или на 44,8%; годовой экономический эффект за счет снижения приведенных затрат составит 271,7 тыс. руб.; удельный расход энергии снижается в 6 раз; экономический эффект от снижения энергетических затрат составит 171,41 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Анализ конструктивно-технологических особенностей измельчителей грубых стебельных кормов показал, что предлагаемые рынком сельскохозяйственной техники для использования в личных подсобных и крестьянских (фермерских) хозяйствах предназначены в основном для измельчения стеблей злаковых культур. Существующие измельчители толстостебельных грубых кормов отечественного производства имеют большую металлоемкость, достаточно большую энергоемкость процесса измельчения вследствие использования в качестве привода нескольких электродвигателей различной мощности.

2. Разработана конструктивно-технологическая схема измельчителя для крестьянских (фермерских) хозяйств, обеспечивающая эффективное измельчение грубых толстостебельных кормов с минимальными энергетическими затратами (патент РФ №168572 на полезную модель).

3. Получены аналитические зависимости взаимодействия рабочего органа измельчителя с измельчаемым материалом, позволяющие установить: силы, возникающие в процессе резания грубых толстостебельных кормов; работу и мощность, затрачиваемые на измельчение исходного материала; общую мощность, потребляемую измельчителем в процессе работы; производительность измельчителя; степень и энергоемкость измельчения материала.

4. Разработан опытный образец измельчителя грубых толстостебельных кормов, основными рабочими органами которого являются основной и подающий валы с зубьями шириной 0,007 м, длиной 0,04 м, с шагом 0,02 м. Для исключения забивания рабочих органов валы вращаются с разной частотой.

5. В результате проведенных экспериментальных исследований установлены оптимальные значения числа оборотов режущих ножей (1974 об/мин), межосевого расстояния между основным и подающим валами (0,095 м) и скорости подачи исходного материала (0,09 м/с), при которых обеспечивается минимальная энергоемкость процесса измельчения (1,33 кВт·ч/т). Производительность измельчителя 0,9-3 т/ч.

6. Использование измельчителя грубых толстостебельных кормов позволяет снизить себестоимость продукции в 1,8 раза. Годовой экономический эффект за счет снижения приведенных затрат составит 271,7 тыс. руб.

Рекомендации производству

Для крестьянских (фермерских) хозяйств предлагается измельчитель грубых толстостебельных культур со следующими техническими характеристиками: производительность – 0,9-3 т/ч; длина резки – 10-50 мм; мощность двигателя – 5,5 кВт; число оборотов: основного вала – 1974 мин⁻¹, подающего вала – 100 мин⁻¹; межосевое расстояние – 0,095 м; скорость подачи исходного материала – 0,09 м/с; масса – 62 кг; обслуживающий персонал – 1 чел.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Предложенные методики, технико-технологические решения могут служить основой к расширению научных исследований и практической реализации устойчивого развития кормопроизводства в условиях крестьянских (фермерских) хозяйств.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Габачиев, Д. Т. Обоснование энергоресурсосберегающих технико-технологических решений в кормопроизводстве / **Д. Т. Габачиев** // АгроЭкоИнфо.– 2025.– № 4 (70).– URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/4/st_408.pdf. – DOI: <https://doi.org/10.51419/202154408>.

2. Габачиев, Д. Т. Обоснование конструктивно-технологической схемы измельчителя грубых кормов / **Д. Т. Габачиев**, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // АгроЭкоИнфо.– 2017.– № 2 (28).– URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/2/st_207.doc.

3. Габачиев, Д.Т. Математическое моделирование процесса работы измельчителя грубых кормов / **Д. Т. Габачиев**, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // АгроЭкоИнфо.– 2017.– № 2 (28).– URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/2/st_219.doc.

4. Габачиев, Д. Т. Оптимизация параметров и режимов работы измельчителя кормов / **Д. Т. Габачиев**, Л. М. Хажметов, Л. З. Шекихачева // АгроЭкоИнфо.– 2017.– № 4 (30).– URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_402.doc.

Патент на полезную модель

5. Патент 168572 U1 Российская Федерация, МПК В02С4/02. Измельчитель грубых кормов: № 2016118869: заявл. 16.05.2016: опубл. 09.02.2017: бюл. №4 / А. К. Апажев, Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев, **Д. Т. Габачиев** [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» (Кабардино-Балкарский ГАУ).

Публикации в рецензируемых научных изданиях

6. Хажметов, Л. М. Конструктивные особенности измельчителей грубых толстостебельных кормов / Л. М. Хажметов, **Д. Т. Габачиев**, К. Л. Хажметов // Энергетическая, экологическая и продовольственная безопасность: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции.– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022.– С. 162-166.

7. Габачиев, Д. Т. Экспериментальные исследования процесса работы разработанного измельчителя грубых кормов / **Д. Т. Габачиев**, Л. М. Хажметов // Реализация приоритетных программ развития АПК: сборник научных трудов по итогам X Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки РФ и КБР, профессора Б.Х. Жерукова.– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022.– С. 309-314.

8. Габачиев, Д.Т. Определение механической характеристики рабочего механизма измельчителя / **Д. Т. Габачиев**, Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев // Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Нальчик, 2021. – С. 164-170.

9. Габачиев, Д.Т. Оптимизация параметров работы измельчителя кормов / **Д. Т. Габачиев**, Л. М. Хажметов // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность: материалы VII Международной научно-практической

конференции, посвященной памяти Заслуженному деятелю науки РФ, КБР, Республики Адыгея профессора Б.Х. Фиапшева.– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2021.– С.208-211.

10. Хажметов, Л. М. Результаты исследований конструктивно-режимных параметров измельчителя грубых кормов / Л. М. Хажметов, **Д. Т. Габачиев** // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова.– 2020.– № 4 (30).– С. 79-86.

11. Apazhev, A. K. Scientific justification of power efficiency of technological process of crushing of forages / A. K. Apazhev, Y. A. Shekikhachev, L. M. Hazhmetov, A. G. Fiapshev, L. Z. Shekikhacheva, Y. S. Napov, Z. L. Hazhmetova, **D. T. Gabachiyev** // Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019».– Vol. 1399. – 2019. – 055002. – DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055002. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1399/5/055002/pdf>.

12. Хажметов, Л.М. Измельчитель для приготовления комбинированных кормов / Л. М. Хажметов, **Д. Т. Габачиев** // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК: сборник научных статей XII Международной научно-практической конференции, в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агро-универсал – 2016».- Ставрополь: Издательство «Агрус», 2026.- С. 114-118.

Подписано в печать 03.10.2025 г.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ №

Типография ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»

360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в