

На правах рукописи



Вертий Александр Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ГРУБЫХ СТЕБЕЛЬЧАТЫХ КОРМОВ**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель

Гулевский Вячеслав Анатольевич
доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Алдошин Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины»;

Саенко Юрий Васильевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина», профессор кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе».

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина».

Защита состоится 20 июня 2019 года в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе 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 научной 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=7183>.

Автореферат разослан 26 апреля 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Решение задачи продовольственной безопасности возможно только при наличии хорошо развитой отрасли животноводства, что требует постоянного совершенствования технических средств и повышения их уровня эффективности.

Важнейшим направлением животноводства является скотоводство, в частности, выращивание крупного рогатого скота (КРС) и мелкого рогатого скота (МРС). Эффективное скотоводство невозможно без применения современных средств механизации производства, в том числе и кормопроизводства.

Основными компонентами кормовых смесей для КРС являются грубые стебельчатые корма, перевариваемость которых в значительной мере зависит от качества подготовки к скармливанию. В процессе подготовки к скармливанию важное место занимает измельчение, поскольку именно измельчение является наиболее энергоемкой операцией.

Для измельчения грубых кормов промышленность выпускает различные машины и кормоприготовительные агрегаты. Однако большинство из них не обеспечивает регламентированной зоотехническими требованиями степени измельчения, и обладает весьма большой энергоемкостью процесса, а машины материалоемкие и габаритные. Кроме того, многие измельчители неудобны в эксплуатации и недостаточно надежны.

Низкая универсальность большинства существующих измельчителей не позволяет широко использовать их при измельчении разнообразных грубых кормов, многие из которых обладают прочным стеблем (например, кукуруза, сахарное сорго, сорго-суданковый гибрид и т.д.).

Существенным недостатком измельчителей является высокая стоимость, что делает невозможным использование целого ряда машин в личных подсобных и фермерских хозяйствах. Поэтому разработка измельчителя, который по производительности, энергоемкости процесса и качеству работы подходил бы для ферм с различным поголовьем является весьма актуальной задачей, требующей научного подхода и тщательного обоснования.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», утвержденной ученым советом ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (№ 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Значительный вклад в исследование процессов измельчения стебельчатых кормов в сельскохозяйственном производстве внесли многие российские и

зарубежные ученые: В.П. Горячкин, Н.Е. Резник, Н.В. Алдошин, В.Р. Алешкин, В.В. Братишко, С.Ф. Вольвак, Ф.Д. Грязнов, Н.И. Есепчук, В.А. Желиговский, Ю.А. Иванов, Л.П. Крамаренко, Г.М. Кукта, С.В. Мельников, С.И. Назаров, Ю.В. Саенко, И.И. Ревенко, В.Д. Роговой, В.И. Шаповалов, В.С. Хмелевский, Г.С. Ялпачик и многие другие.

Основой всех исследований рабочих органов измельчителей и силосоуборочных комбайнов явились труды основоположника земледельческой механики В.П. Горячкина, создавшего теоретические основы для расчета большинства типов машин сельскохозяйственного назначения.

Для измельчения грубых стебельчатых кормов в настоящее время промышленность выпускает большое количество измельчителей, которые обладают определенными конструктивно-технологическими отличиями.

Необходимость разработки новых конструкций измельчителей обусловлена стремлением снизить энергоемкость процесса измельчения для использования измельчителей в небольших фермерских хозяйствах и личных подворьях.

Цель исследования – повышение эффективности процесса измельчения грубых стебельчатых кормов путем разработки конструкции и обоснования основных параметров измельчителя, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

Задачи исследования:

- на основании анализа существующей теории измельчения и изучения конструктивно-технологических параметров современных измельчителей выявить основные пути совершенствования технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов, определить наиболее перспективную конструкцию измельчителя и направления ее развития;

- предложить конструктивно-технологическую схему эффективного измельчителя и разработать новые математические модели для определения производительности и затрат мощности на измельчение, учитывающие эффект расщепления отсеченных частиц стебля на части при одновременном ударном воздействии на стебли и их скользящем резании шарнирно подвешенными комбинированными ножами;

- провести экспериментальные исследования и выявить наиболее рациональные конструктивно-технологические параметры измельчителя и режимы его работы. Дать оценку построенным математическим моделям, учитывающим эффект расщепления отсеченных частиц стебля на части при одновременном ударном воздействии на стебли и их скользящем резании шарнирно подвешенными комбинированными ножами, доказать их адекватность;

– испытать в производственных условиях экспериментальный образец измельчителя грубых стебельчатых кормов и выполнить оценку эффективности его применения в производстве.

Объект исследования – технологический процесс измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами.

Предмет исследования – установление закономерности технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем, рабочий орган которого обеспечивает ударное воздействие на стебель и скользящее резание.

Научная новизна:

– обоснованы конструктивно-технологические параметры измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами, с учетом энергетических и качественных показателей технологического процесса измельчения;

– установлены аналитические зависимости для определения производительности измельчителя грубых стебельчатых кормов, учитывающие эффект расщепления отсекаемых частиц стебля на куски при измельчении;

– получена аналитическая зависимость, определяющая затраты мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов, учитывающая неоднородную структуру внутреннего строения стебля;

– предложена методика инженерного расчета параметров рабочих органов измельчителя грубых стебельчатых кормов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в получении аналитических зависимостей для определения производительности измельчителя грубых стебельчатых кормов с учетом эффекта расщепления отсекаемых частиц стебля на куски при измельчении; затрат мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов с учетом неоднородной структуры внутреннего строения стебля, которые дополняют теорию сельскохозяйственных машин.

Практическая значимость работы заключается в разработке эффективного измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами; обосновании оптимальных конструктивно-технологических параметров нового измельчителя грубых стебельчатых кормов. Новизна технических решений, реализованных в новом измельчителе грубых

стебельчатых кормов, подтверждена патентом Украины на полезную модель № 69756.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования основаны на системном анализе взаимодействия рабочих органов измельчителя и слоя грубых стебельчатых кормов. Использовалась общая теория резания и основные положения математического анализа и теоретической механики. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с самостоятельно разработанными и известными методиками в лабораторных условиях на разработанной автором экспериментальной установке с использованием современных методов и оборудования для регистрации полученных данных, а также методов планирования одно- и многофакторного эксперимента и статистической обработки результатов исследования на персональном компьютере.

Положения, выносимые на защиту:

- конструктивно-технологические параметры измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами, позволяющие повысить эффективность технологического процесса измельчения;

- аналитические зависимости для определения производительности измельчителя грубых стебельчатых кормов, позволяющие оценить эффективность работы измельчителя при расщеплении отсекаемых частиц стебля на куски;

- аналитическая зависимость, определяющая затраты мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов, позволяющая установить параметры измельчителя, обеспечивающие минимальные энергозатраты;

- методика инженерного расчета параметров рабочих органов измельчителя грубых стебельчатых кормов, позволяющая проектировать измельчители.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты исследований получены с применением апробированных теоретических положений, обработкой аналитических зависимостей на компьютере с использованием прикладных математических программ, путем проведения эксперимента по методу планирования факторных экспериментов и статистической обработки экспериментальных данных. Достоверность теоретических положений подтверждается достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований (отклонения 5...7 %).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-практических конференциях Луганского национального аграрного университета (2010–2014 годы), ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ (2017–2019 годы), на

международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Роль аграрной науки в развитии АПК РФ» (г. Воронеж, 2017 г.), на XXI международной научно-производственной конференции «Проблемы и решения современной аграрной экономики» (п. Майский, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017 г.), на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке» (п. Майский, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018 г.).

Результаты исследования внедрены на предприятии ЧСП «Колос» Луганской Народной Республики и используются в учебном процессе ГОУ ВО Луганский национальный аграрный университет, что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад соискателя. Основные исследования по теме диссертационной работы выполнены соискателем лично, в частности:

- проанализированы основные пути повышения эффективности технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов, систематизирована научная информация по созданию нового измельчителя и усовершенствована существующая классификация рабочих органов измельчителей грубых стебельчатых кормов;

- разработана конструктивно-технологическая схема нового измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами;

- обоснованы рациональные и оптимальные конструктивно-технологические параметры нового измельчителя грубых стебельчатых кормов и установлены новые закономерности влияния данных параметров на эффективность выполнения процесса измельчения;

- экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований и определены рациональные и оптимальные значения основных конструктивно-технологических параметров нового измельчителя грубых стебельчатых кормов, рабочий орган которого одновременно обеспечивает ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами;

- предложены рекомендации по эффективному использованию разработанного измельчителя грубых стебельчатых кормов в производстве.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 12 статей, в том числе пять статей – в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, получен патент Украины на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 134 наименований, и пяти приложений. Общий объем диссертации – 158 страниц, работа содержит 54 рисунка, 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

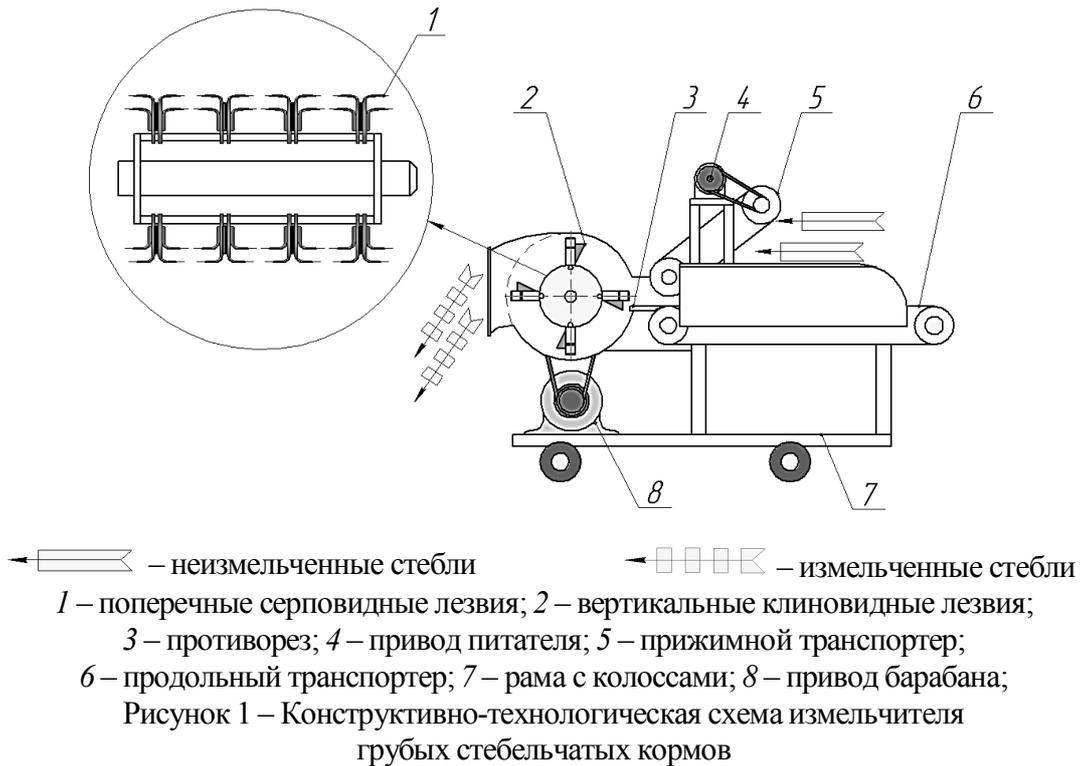
В первом разделе проанализированы требования, предъявляемые к грубым стебельчатым кормам и их механико-технологические свойства, оказывающие наиболее существенное влияние на эффективность процесса измельчения (структура, строение стебля, влажность, плотность, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, угол естественного откоса, сопротивление измельчению и др.).

На основании аналитического обзора существующих конструкций измельчающих аппаратов и их рабочих органов, теоретических исследований процесса измельчения грубых стебельчатых кормов, представленных такими учеными, как Н.Е. Резник, Л.П. Карташов, И.И. Ревенко, В.В. Шацкий, Н.В. Брагинец, В.И. Шаповалов, С.И. Рустамов, В.И. Передня, С.Ф. Вольвак и др., сделан вывод, что для измельчения наиболее перспективным является рабочий орган барабанного типа, осуществляющий скользящее резание с одновременным расщеплением стебля, который позволит снизить энергоемкость процесса измельчения за счет рационального распределения сил, действующих на измельчаемый материал.

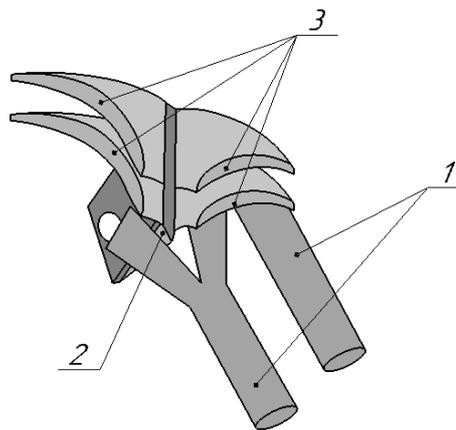
Проведенные аналитические исследования позволили установить, что необходимо разработать новый измельчитель, характеризующийся низкой энергоемкостью и применимостью в современных поточно-технологических линиях кормоприготовления, а также имеющий широкий диапазон регулирования параметров, обеспечивающий адаптацию к условиям работы с грубыми кормами, обладающими прочным стеблем. В соответствии с вышеизложенным сформулированы цель и задачи исследований.

Второй раздел включает обоснование конструктивно-технологической схемы нового измельчителя (рисунок 1) и теоретические исследования процесса измельчения грубых стебельчатых кормов.

Новый измельчитель работает следующим образом. Стебли подаются на горизонтальный транспортер, затем, перемещаясь, сжимаются посредством прижимного транспортера и в спрессованном виде попадают в измельчающий аппарат, где вертикальные клиновидные лезвия расщепляют часть стеблей в продольном направлении, а поперечные серповидные лезвия осуществляют удар по слою стеблей и его скользящее резание. Ударное действие приводит к разрыву армирующих прожилок стебля, в результате чего последующее резание осуществляется с минимальными затратами энергии. Измельченные частички стеблей воздушным потоком выводятся через выгрузную горловину, в которой установлено решето.



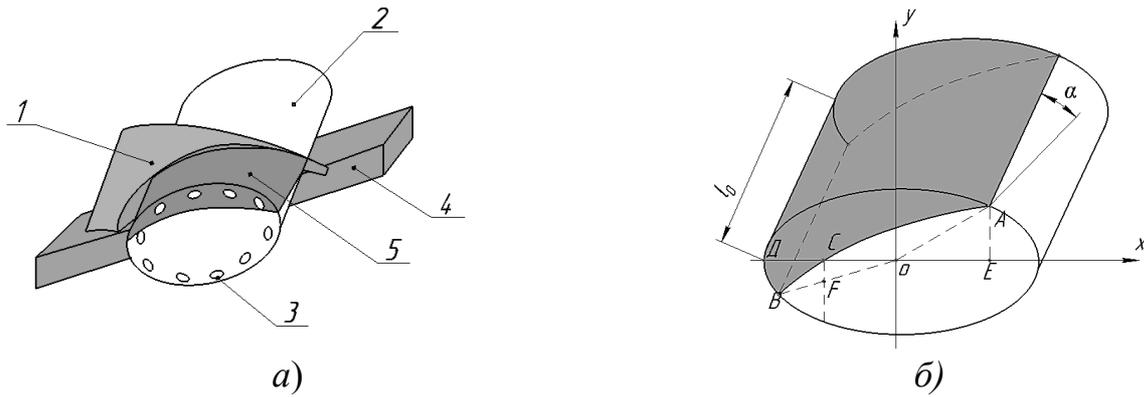
Комбинированные шарнирно подвешенные ножи оснащены четырьмя серповидными лезвиями, расположенными в два яруса симметрично и одним вертикальным клиновидным лезвием (рисунок 2).



1 – измельчаемые стебли; 2 - вертикальное клиновидное лезвие;
3 – поперечные серповидные лезвия

Рисунок 2 – Комбинированный шарнирно подвешенный нож нового измельчителя
грубых стебельчатых кормов

Под действием серповидных лезвий происходит сжатие стеблей, их круглое сечение переходит в эллипс, осуществляется разрыв прочной оболочки и внешних тканей стебля, укрепленных склеренхимой (армирующими прожилками), а также разрез внутренних тканей. В результате происходит измельчение с одновременным расщеплением на части отрезаемых частиц стебля (рисунок 3).



а) – взаимодействие стебля и ножа; б) – схема частицы;

1 – серповидное лезвие комбинированного ножа; 2 – стебель; 3 – армирующие прожилки; 4 – противорежущая пластина; 5 – оторвавшаяся часть отсекаемой частицы; l_0 – длина отделяемой частицы; α – угол, под которым стебель поступает на измельчение;

Рисунок 3 – К обоснованию процесса измельчения

Анализ процесса измельчения позволил установить, что форма отсеченных частиц определяется пересечением эллиптического цилиндра, деформированного силами резания стебля, и цилиндрической поверхности, описываемой режущей кромкой. При этом сама режущая кромка лезвий по форме представляет собой участок спирали Архимеда. Из условий моделирования данных явлений получена зависимость производительности от скорости подачи стеблей и конструктивных особенностей рабочего органа нового измельчителя:

$$W_{uv} = \rho_c \cdot K_{ПН} \frac{\beta_1}{\beta_2} \cdot \frac{v_{сл} \cdot \theta}{l_0 \cdot 2\pi} \cdot \psi \cdot \sum_{i=1}^n \left(\begin{array}{l} \frac{bl_0}{a} (X_A + X_B 2a) - \frac{2(2a^2 - X_B^2 - X_A^2)}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} - \\ -(l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0) \cdot (\varphi_B - \varphi_A) + \\ + (2\varphi_0 l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha \varphi_0) \cdot k \cdot (\varphi_B^2 - \varphi_A^2) + \\ + (l_0 + (X_A - X_B) \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot k^3 (\varphi_B^3 - \varphi_A^3) \end{array} \right), \quad (1)$$

где W_{uv} – производительность измельчителя, кг/с;

ρ_c – объёмная масса корма, уплотнённая питающим аппаратом, кг/м³;

$K_{ПН}$ – количество поперечных лезвий;

β_1 – угол установки ножей первого яруса до удара, град;

β_2 – угол установки ножей второго яруса после удара, град;

$v_{сл}$ – скорость подачи слоя на измельчение, м/с;

θ – центральный угол между ножами;

l_0 – длина отделяемой частицы, м;

ψ – коэффициент, учитывающий снижение пропускной способности барабанного измельчителя из-за несовершенства питающего аппарата;

X_A, X_B – геометрические параметры исходного сечения стебля;

φ_0 – угол между стеблем и режущим инструментом;

a, b – полуоси эллипса.

На основании выражения (1) построена теоретическая зависимость производительности нового измельчителя от частоты вращения его рабочего органа (рисунок 4).

Частота вращения рабочего органа выражается из угловой скорости, являющейся функцией линейной скорости подачи слоя на измельчение, центрального угла между ножами и длины отсекаемых частиц.

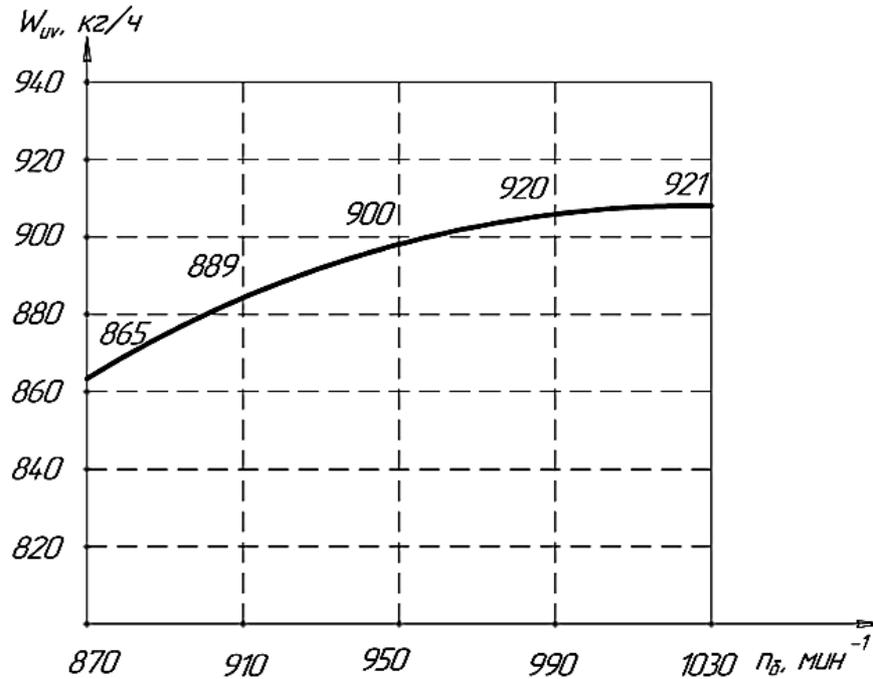


Рисунок 4 – Теоретическая зависимость производительности нового измельчителя от частоты вращения его рабочего органа

Теоретическая зависимость показывает, что максимальное значение производительности достигается в интервале частот вращения барабана 990...1030 мин⁻¹.

Предлагается рабочий процесс измельчения стеблей рассматривать в два этапа с чередованием четырех вариантов напряженно-деформированного состояния (рисунок 5).

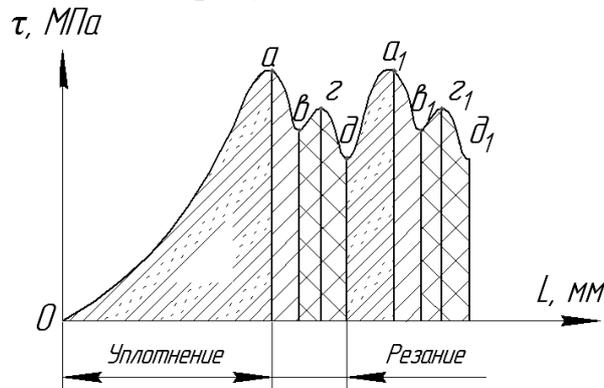


Рисунок 5 – Этапы напряженно-деформированного состояния стеблей

Процесс измельчения единичного стебля характеризуется поочередной сменой упругих деформаций армирующих прожилок стебля (∂, a_1), их пластической деформацией (a_1, ϵ_1), а затем сменой упругих деформаций основного материала стебля (ϵ_1, z_1), его пластической деформацией (z_1, ∂_1).

Усилие, необходимое для измельчения стебля P_{pn} , Н, составит:

$$P_{pn} = P_{pn1} + P_{pn2} + P_{pn3} + P_{pn4}, \quad (2)$$

где P_{pn1} – сила, создающая упругие деформации армирующих прожилок стебля, Н;

P_{pn2} – сила, создающая пластические деформации армирующих прожилок стебля, Н;

P_{pn3} – сила, создающая упругие деформации основного материала стебля, Н;

P_{pn4} – сила, создающая пластические деформации основного материала, Н.

Определив эквивалентную толщину, абсолютную деформацию и площади поперечного сечения измельчаемого слоя прожилок и основного материала стебля, можно рассчитать усилие, необходимое для измельчения и затраченную мощность при заданной рациональной частоте вращения рабочего органа:

$$N_{\delta} = \frac{K_{\Pi\Pi} \cdot n_{\delta}}{\Delta S \cdot 60} \cdot \left(\frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{\Pi}}{h_i'} + \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_o}{h_i''} + \sum_{i=1}^n F_i \right) \times \left[\frac{b}{2a} \left(x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left(\arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - 1,5ab\pi + 0,5x_A y_A (\varphi_o + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi \right], \quad (3)$$

где N_{δ} – мощность, необходимая для измельчения, Вт;

n_{δ} – частота вращения барабана, мин^{-1} ;

h_i', h_i'' – эквивалентная толщина измельчаемого слоя прожилок и основного материала стебля, соответственно, мм;

$\Delta h_i', \Delta h_i''$ – абсолютная деформация, вызывающая появление разреза, измельчаемого слоя прожилок и основного материала стебля, соответственно, мм;

E', E'' – модуль упругости материала прожилок и основного материала стебля, соответственно, МПа.

$\Sigma S_{\Pi}, \Sigma S_o$ – общая площадь поперечного сечения армирующих прожилок и основного материала стебля, соответственно, мм^2 ;

ΔS – длина загруженной части лезвия ножей, м.

Третий множитель формулы (3) является выражением, определяющим площадь поперечного сечения отсекаемой части в отделенной частице стебля (см. рисунок 3б).

Сумма сил трения, действующих на боковые грани и лезвия $\sum_{i=1}^n F_i$, Н, составит:

$$\sum_{i=1}^n F_i = F_1 + F_2 + F_3, \quad (4)$$

где F_1 – абсолютное значение силы трения материала о тыльную часть лезвия, Н;

F_2 – абсолютное значение силы трения материала о вертикальную часть лезвия, Н;

F_3 – абсолютное значение силы трения материала о режущую кромку лезвия, Н.

На основании выражения (3) построена теоретическая зависимость затрат мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов от частоты вращения рабочего органа измельчителя (рисунок 6).

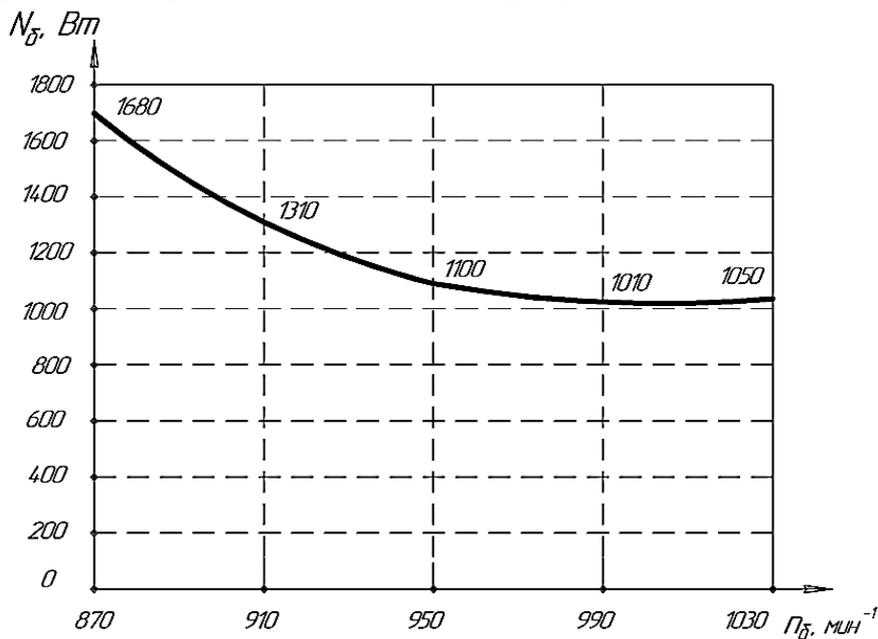


Рисунок 6 – Теоретическая зависимость затрат мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов от частоты вращения рабочего органа измельчителя

Теоретическая зависимость показывает, что минимальное значение затрат мощности на измельчение достигается в интервале частот вращения барабана 950...1030 мин⁻¹. Полученный рациональный интервал частот вращения барабана охватывает рациональный интервал, определенный по показателю производительности. В данном рациональном интервале функция затрат мощности достигает своего минимума (нижний экстремум функции) при частоте вращения рабочего органа 990 мин⁻¹. При уменьшении или увеличении частоты вращения рабочего органа относительно точки нижнего экстремума значение мощности начинает плавно возрастать, что указывает на начало преобладания рубки над скользящим резанием, вследствие чего нерационально используется

рабочая часть лезвия, уменьшается его загруженная часть и увеличиваются абсолютные значения сил трения.

Показателем эффективности процесса измельчения грубых стебельчатых кормов является энергоёмкость. На основании теоретических зависимостей производительности и затрат мощности на измельчение грубых стебельчатых кормов от частоты вращения рабочего органа измельчителя была определена теоретическая энергоёмкость процесса измельчения \mathcal{E}_y , кВт·ч/т, определяемая по формуле:

$$\mathcal{E}_y = \frac{N_{\sigma}}{W_{uv}}. \quad (5)$$

Зависимость энергоёмкости процесса измельчения грубых стебельчатых кормов от частоты вращения рабочего органа приведена на рисунке 7.

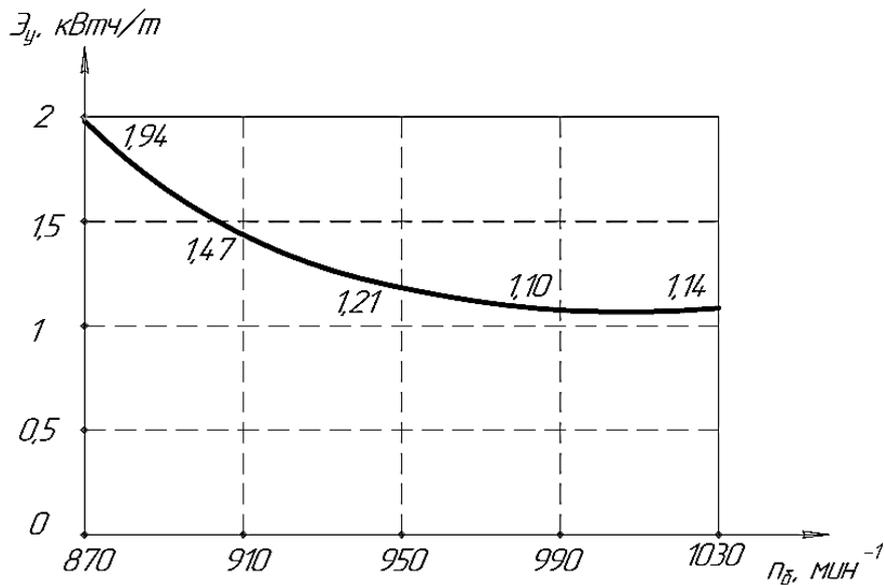


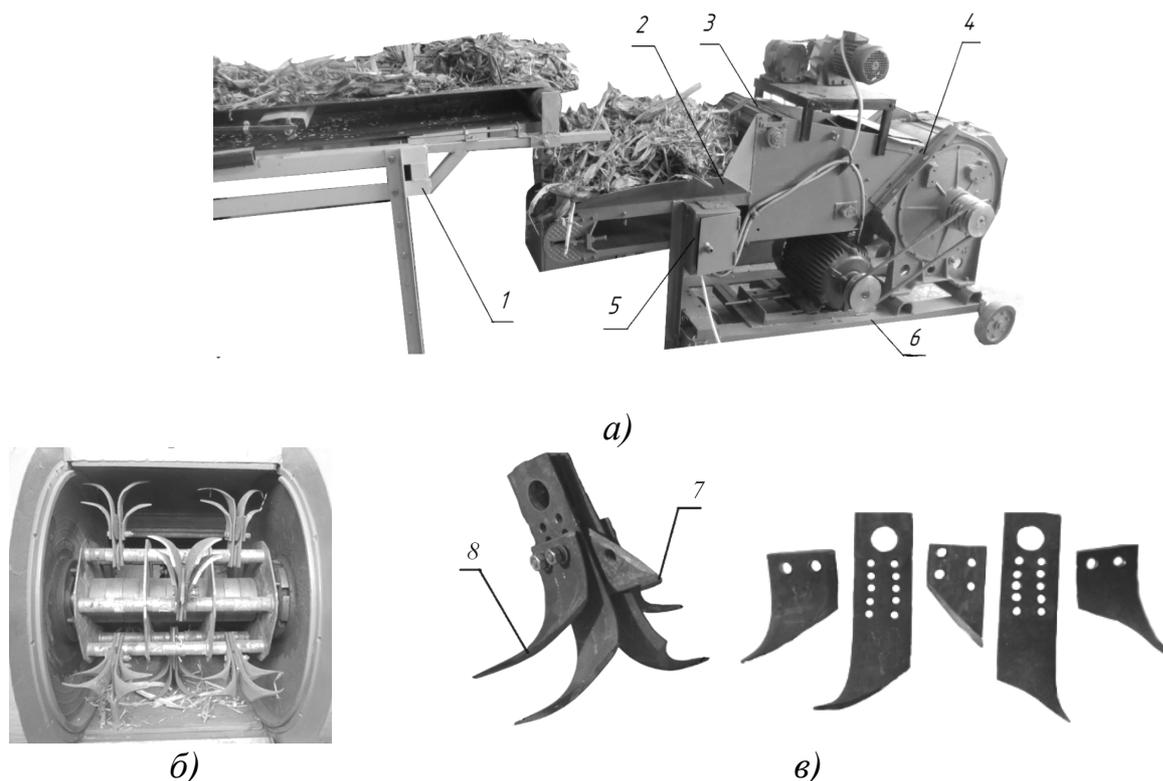
Рисунок 7 – Теоретическая зависимость удельной энергоёмкости процесса измельчения стебельчатых кормов от частоты вращения его рабочего органа

Теоретическая зависимость подтверждает, что ранее выбранный рациональный интервал частот вращения рабочего органа 950-1030 мин⁻¹ является рациональным, поскольку энергоёмкость достигает своего минимального значения 1,1-1,21 кВт·ч/т. Данный интервал частот вращения рабочего органа измельчителя был заложен в методику экспериментальных исследований и изучен экспериментально во взаимосвязи с другими факторами.

В третьем разделе представлены программа, методика и результаты экспериментальных исследований.

Исследования проводились в соответствии с современными требованиями к испытаниям сельскохозяйственной техники.

Для проведения экспериментов была сконструирована экспериментальная установка (рисунок 8).



а) – общий вид измельчителя; б) – новый рабочий орган; в) – комбинированный нож измельчителя; 1 – подающий транспортер; 2 – питающий транспортер измельчителя; 3 – наклонный транспортер измельчителя; 4 – камера измельчения; 5 – пульт управления; 6 – общая рама с системой привода узлов; 7 – клиновидное лезвие; 8 – серповидное лезвие

Рисунок 8 – Экспериментальная установка

Экспериментальная установка оснащена электронной системой контроля подаваемой на измельчение массы ADAM-4016, цифровым тахометром UT372 и лабораторным измерительным комплектом К-505. Расчетным путем и поисковыми экспериментами установлены следующие конструктивные параметры экспериментального измельчителя: диаметр барабана в рабочем состоянии 500 мм, длина барабана 450 мм, высота расположения оси барабана над противорезом 52 мм, количество осей подвеса ножей 6, конструктивная длина комбинированного ножа 177 мм, длина одного поперечного лезвия 86 мм.

Экспериментальные исследования проводились на стебельной массе кукурузы. В результате контроля механико-технологических свойств фиксировалась влажность измельчаемых стеблей, их фрикционные свойства и эквивалентная толщина измельчаемого слоя прожилки и основного материала стебля.

Установлено значение статического коэффициента трения внешней оболочки и внутреннего материала расщепленного стебля кукурузы, который составил 0,541 и 0,449 соответственно. Установлено значение динамического коэффициента трения внешней оболочки и внутреннего материала расщепленного стебля кукурузы, который составил 0,380 и

0,320 соответственно. Коэффициенты трения определены при фиксированной влажности стеблей 24%. Среднее значение эквивалентной толщины измельчаемого слоя прожилок и основного материала стебля составляет 2,98 и 24,81 мм соответственно.

При проведении экспериментов контролировалась пропускная способность измельчителя, затраты энергии на измельчение и качество измельчения по показателю длины измельченных частиц.

При однофакторных исследованиях производительности измельчителя обеспечивалась подача 0,15; 0,20 и 0,25 (540; 720; 900 кг/ч). Устанавливалась частота вращения рабочего органа 870, 910, 950, 990 и 1030 мин⁻¹. При этом зазор между поперечными серповидными ножами был зафиксирован и составлял 25 мм. На барабан поочередно устанавливалось 3, 6, 9 и 12 комбинированных ножей, а в выгрузное окно было установлено решето с размером ячейки 40x40 мм.

Экспериментально установлено, что увеличивать подачу более 0,25 кг/с (900 кг/ч) нецелесообразно, поскольку даже при такой подаче измельчитель достигает своей максимально возможной производительности 0,246 кг/с (884 кг/ч) на максимальных оборотах барабана (рисунок 9).

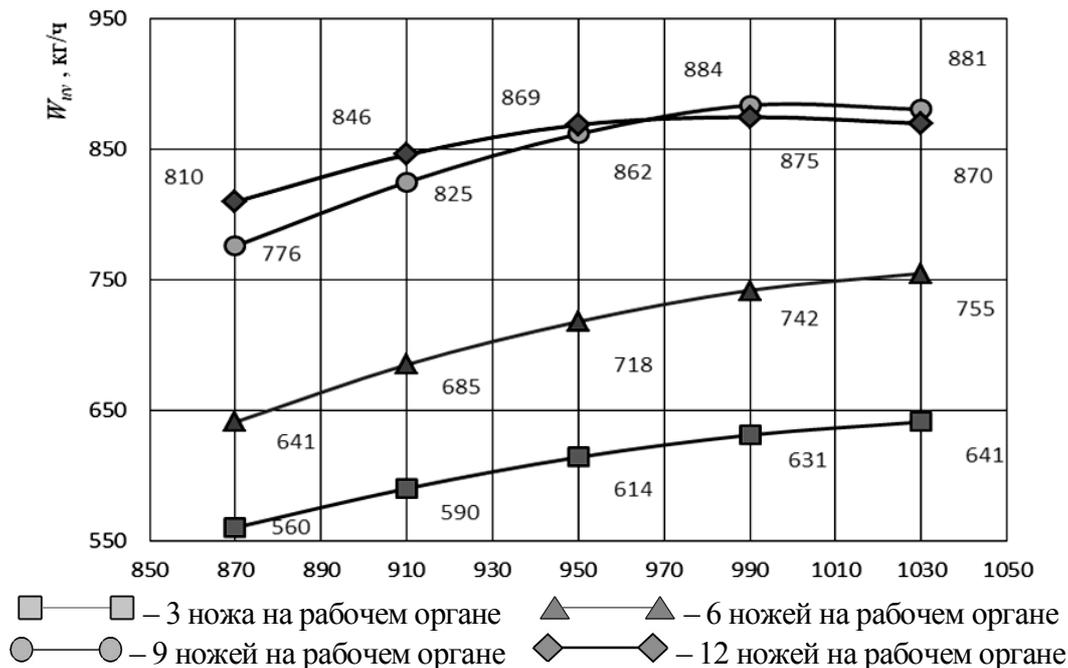


Рисунок 9 – Экспериментальная зависимость производительности измельчителя от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при подаче стеблей на измельчение 0,25 кг/с (900 кг/ч)

Кроме того, эксперимент позволил сузить область поиска рационального количества ножей на барабане до двух вариантов – 9 и 12 штук.

Исходя из полученных результатов в однофакторном эксперименте по изучению затрат мощности на барабан устанавливалось только 9 и 12 ножей. При этом подача составляла 0,25 кг/с, зазор между поперечными серповидными лезвиями 25 мм, а частота вращения рабочего органа

составляла 870, 910, 950, 990 и 1030 мин⁻¹. Результаты экспериментов приведены на рисунке 10.

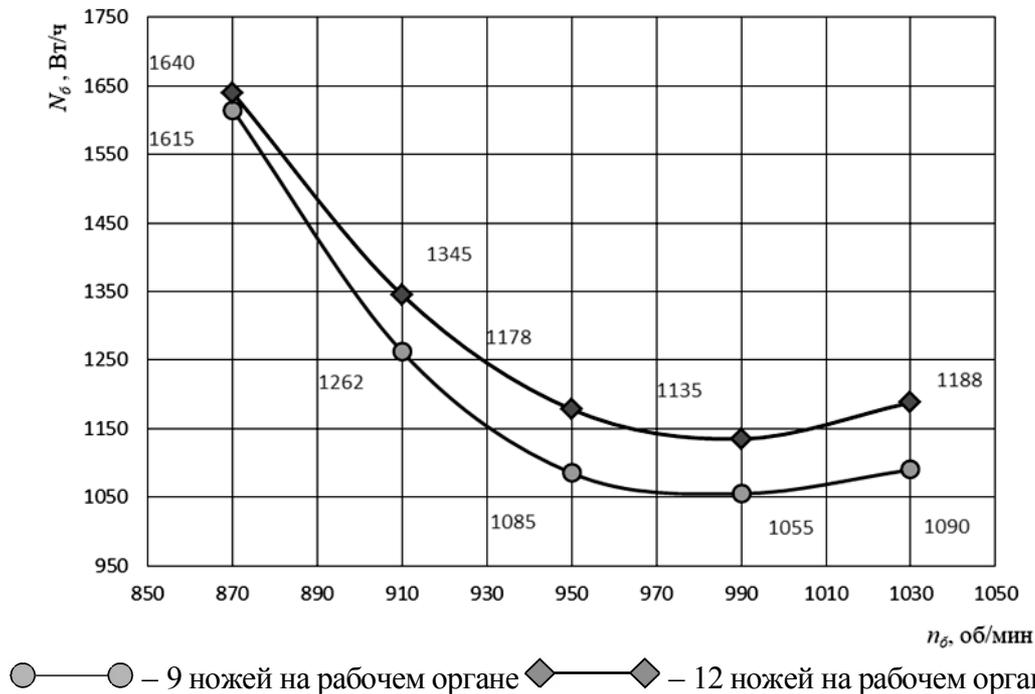


Рисунок 10 – Экспериментальная зависимость затрат мощности на измельчение от частоты вращения рабочего органа и количества комбинированных ножей при подаче стеблей на измельчение 0,25 кг/с (900 кг/ч)

Анализ результатов экспериментов показал, что рациональное количество комбинированных ножей на рабочем органе составляет 9 штук. Схема установки ножей на шести осях подвеса 2:1:2:1:2:1. Увеличение количества ножей приводит к росту затрат мощности, при этом затраты мощности на измельчение возрастают по следующим причинам: увеличивается масса барабана, возрастает вентиляционный эффект, создаваемый ножами; при работе на девяти комбинированных ножах сквозь слой подаваемого материала проходит сначала 8 серповидных лезвий, а затем 4 серповидных лезвия. Это обеспечивает пульсирующее силовое воздействие на слой, способствующее расщеплению стеблей.

Полученный в результате экспериментов рациональный интервал частот 950-1030 мин⁻¹ совпадает с теоретическими данными, поэтому он и был использован при оптимизации процесса измельчения.

Средняя длина измельчённых частиц изучалась в рациональном интервале частот вращения барабана при 9 ножах, подаче 25 кг/с и зазоре между поперечными серповидными лезвиями ножа 25 мм. При этом в выгрузное окно устанавливались решета с ячейкой 30x30, 40x40 и 50x50 мм. Установлено, что по показателю средней длины измельченных частиц рациональное значение размера ячейки решета составляет 40x40, при этом контролируемый параметр находится в интервале 39,9...47,2 мм. Для КРС данный показатель удовлетворяет зоотехническим требованиям.

В четвертом разделе представлена методика и результаты проведения многофакторного эксперимента, а также сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований и методика инженерного расчета параметров рабочих органов нового измельчителя.

Для анализа результатов экспериментальных исследований и обработки опытных данных использовались программы: STATUP «Регрессионный многофакторный анализ», Statistica 8 for Windows и Mathcad 15. Был реализован трехуровневый план Бокса-Бенкина для трех факторов. План и кодирование факторов эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – План и кодирование факторов эксперимента

Наименование	Значения		
Обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Наименование фактора	Частота вращения барабана, $n_6, \text{мин}^{-1}$	Подача кормов в камеру измельчения, $q_c, \text{кг/с}$	Зазор между серповидными лезвиями ножа, $h_4, \text{мм}$
Базовый уровень	990	0,25	25
Интервал варьирования	40	0,03	5
Верхний уровень фактора	1030	0,28	30
Нижний уровень фактора	950	0,22	20
Функция отклика	Y – энергоемкость процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов, $\mathcal{E}_y, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$		

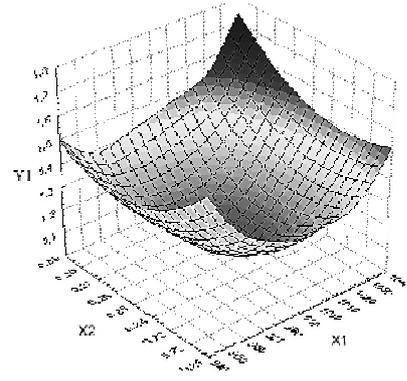
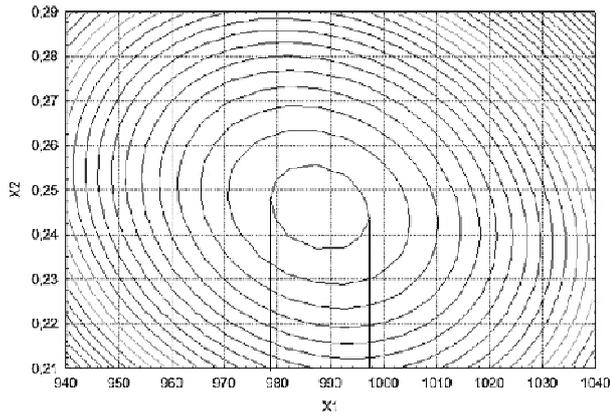
В результате статистической обработки результатов многофакторного эксперимента было получено уравнение регрессии в раскодированном виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_y = & 147,799219 - 0,264146 \cdot n_6 + 0,000127 \cdot n_6^2 - 109,750000 \cdot q_c + \\ & + 125,000000 \cdot q_c^2 - 0,213042 \cdot h_4 - 0,001400 \cdot h_4^2 + 0,045833 \cdot n_6 \cdot q_c + \\ & + 0,000112 \cdot n_6 \cdot h_4 + 0,116667 \cdot q_c \cdot h_4. \end{aligned} \quad (6)$$

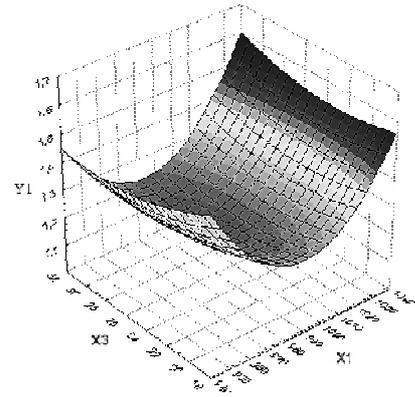
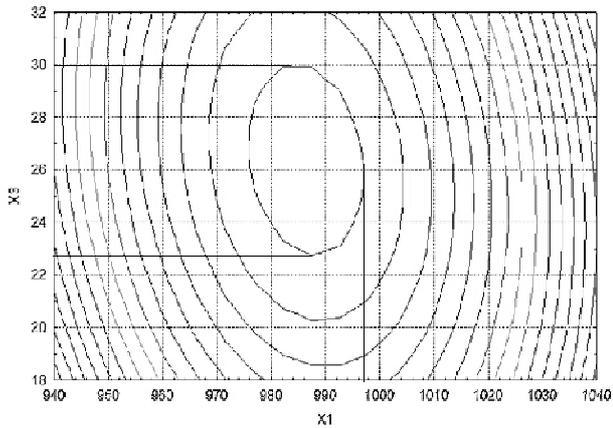
Математическая обработка уравнения регрессии и графоаналитический анализ поверхностей отклика (рисунок 11), позволил получить оптимальные значения факторов (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчета оптимальных значений факторов

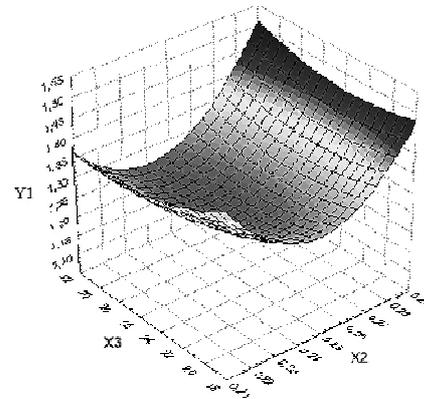
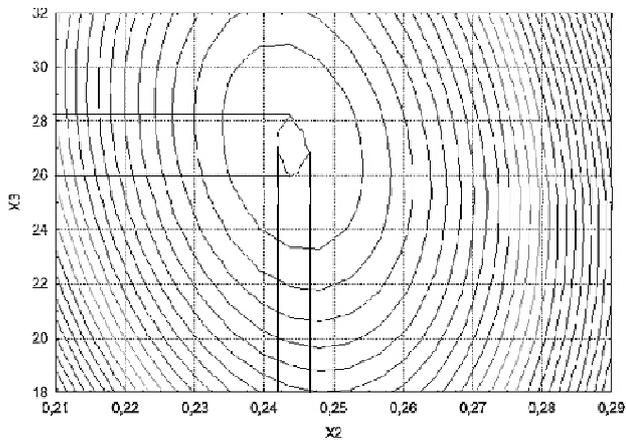
Наименование фактора	$n_6, \text{мин}^{-1}$	$q_c, \text{кг/с}$	$h_4, \text{мм}$
Значение фактора	988	0,263	24
Энергоемкость процесса измельчения $\mathcal{E}_y = 1,08, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$			



a)



б)



в)

Рисунок 11 - Энергоемкость процесса измельчения грубых стебельчатых кормов при фиксированном значении одного фактора:

а) – X_3 ($h_4 = 24$ мм); б) – X_2 ($q_c = 0,263$ кг/с); в) – X_1 ($n_6 = 988$ об/мин)

Теоретическое значение энергоемкости процесса измельчения грубых стебельчатых кормов, в рациональном интервале частот вращения измельчающего барабана, составляет 1,1...1,14 кВтч/т. Оптимальная удельная энергоемкость, полученная в результате проведения многофакторного эксперимента, составляет 1,08 кВтч/т. Данный показатель ниже, чем в прототипе – измельчителе РСС-6Б, на 45,3%.

Расхождение результатов теории и экспериментов по энергоемкости не превышает 5%. Таким образом, установлено, что результаты экспериментальных исследований согласуются с данными, полученными расчетным путем по разработанным ранее математическим моделям. Расхождения результатов теории и практики соответствуют доверительной вероятности $p=0,95$.

В пятом разделе представлены результаты определения годового экономического эффекта от внедрения нового измельчителя. В сравнении с измельчителем РСС-6Б, новый измельчитель показал годовой экономический эффект 7674 руб, а срок окупаемости капиталовложений 3,12 года. При этом в сравнении с базовым вариантом, удельные капиталовложения снижаются с 61,6 руб/т до 55,8 руб/т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повысить эффективность технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов можно путем применения барабанного рабочего органа, обеспечивающего ударное воздействие на стебли и их скользящее резание шарнирно подвешенными комбинированными ножами, включающими вертикальные клиновидные и расположенные в два яруса поперечные серповидные лезвия, режущая кромка которых представляет собой участок спирали Архимеда.

2. Процесс измельчения стеблей предложенным рабочим органом представляет собой отсечение частиц определенной длины с их одновременным расщеплением на части. Данные явления учтены в новых математических моделях (1) и (3), позволяющих определить производительность и затраты мощности на измельчение. Модели учитывают строение измельчаемых стеблей, изменение формы их поперечного сечения при контакте с лезвиями, а также количество лезвий и кривизну их режущей кромки.

3. Для теоретического определения затрат мощности на измельчение, поисковыми экспериментами установлен:

- статический и динамический коэффициент трения внешней оболочки стебля 0,541 и 0,380, соответственно;
- статический и динамический коэффициент трения внутреннего материала стебля 0,449 и 0,320, соответственно.

4. Экспериментально-теоретическим путем установлены следующие рациональные значения конструктивных параметров нового измельчителя:

- диаметр барабана в рабочем состоянии 500 мм;
- длина барабана 450 мм;
- высота расположения оси барабана над противорезом 52 мм;
- количество осей подвеса ножей 6;

- количество комбинированных ножей 9; каждый нож включает одно вертикальное клиновидное и четыре поперечных серповидных лезвия;
- схема установки ножей на шести осях подвеса 2:1:2:1:2:1;
- конструктивная длина комбинированного ножа 177 мм;
- длина одного поперечного лезвия 86 мм;
- ячейка решета выгрузного окна 40x40 мм.

При этом обеспечиваются минимальные затраты энергии на измельчение грубых стебельчатых кормов, а длина измельченных частиц находится в пределах 39,9...47,2 мм. Для КРС данный показатель удовлетворяет зоотехническим требованиям.

5. В результате многофакторного эксперимента установлено, что предложенная конструкция измельчителя при частоте вращения рабочего органа 988 мин^{-1} , подаче стеблей на измельчение 0,263 кг/с (946,8 кг/ч) и зазоре между поперечными серповидными лезвиями комбинированных ножей 24 мм позволяет обеспечить показатель энергоемкости процесса в пределах 1,08 кВт·ч/т. Данный показатель ниже чем у прототипа, измельчителя РСС-6Б, на 45,3%. Расхождение результатов теоретических исследований и полученных экспериментальных данных не превышает допустимые 5%.

6. Разработана методика инженерного расчета параметров измельчителя грубых и стебельчатых кормов, в которой применены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

7. Техничко-экономический анализ технологического процесса измельчения грубых стебельчатых кормов новым и промышленным измельчителем РСС-6Б показал, что годовой экономический эффект составляет 7674 руб., а срок окупаемости первоначальных капитальных вложений составляет 3,12 года.

Рекомендации производству

Предложенная конструкция измельчителя грубых стебельчатых кормов, математические модели и методика инженерного расчета рекомендованы конструкторским организациям при разработке поточно-технологических линий приготовления кормовых смесей для КРС в условиях крупных ферм, а также фермерских и личных подсобных хозяйств.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшие теоретические исследования процесса измельчения и исследовательская работа по совершенствованию конструкции предложенного измельчителя грубых стебельчатых кормов позволят провести его адаптацию к эффективной работе в условиях приготовления кормов не только крупному, но и мелкому рогатому скоту.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Гулевский В.А. Усовершенствование технологии измельчения грубых стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – № 1(60). – С. 73–81.
2. Гулевский В.А. Математическое моделирование работы измельчителя кормов / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – Вып. 3. – С. 120–128.
3. Гулевский В.А. Результаты экспериментально-теоретических исследований энергоемкости процесса измельчения стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / В.А. Гулевский, А.А. Вертий // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2018. – № 2(18). – С. 19–28.
4. Теоретическое обоснование затрат мощности на измельчение стебельчатых кормов измельчителем с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий, Е.Е. Корчагина // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2017. – № 1(13) – С. 23–32.
5. Вольвак С.Ф. Теоретические исследования измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2016. – № 3(11). – С. 24–34.

Публикации в материалах конференций и сборниках научных трудов

6. Демченко В.Н. Повышение эффективности процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов / В.Н. Демченко, А.А. Вертий // Научный вестник Таврического государственного агротехнологического университета. Выпуск. 1. – Том 3.– Мелитополь, 2011. – С. 74–79.
7. Брагинец Н.В. Изучение конструктивно-технологических параметров рабочего органа для измельчения грубых и стебельчатых кормов / Н.В. Брагинец, А.А. Вертий // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко. Выпуск. 132. – Харьков, 2013. – С. 223–227.
8. Брагинец Н.В. Повышение эффективности технологического процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов / Н.В. Брагинец, А.А. Вертий // Научные труды Южного филиала национального университета биоресурсов и природопользования Украины «Крымский агротехнологический университет». – Серия «Технические науки». Выпуск

153. – Симферополь, 2013. – С. 96–99.

9. Брагинец Н.В. Экспериментальные исследования процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов измельчителем с комбинированными ножами / Н.В. Брагинец, А.А. Вертий // Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин: общегосударственный межведомственный научно-технический сборник. – Кировоград: Кировоградский научно-технический университет, 2015. – Выпуск. 45. – Ч. II. – С. 129–134.

10. Вольвак С.Ф. Теоретическое обоснование производительности измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами / С.Ф. Вольвак, Д.Н. Бахарев, А.А. Вертий // Проблемы и решения современной аграрной экономики: материалы XXI международной научно-производственной конференции (п. Майский, 23–24 мая 2017 г.). В 2-х т. Т. 1. – п. Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2017. – С. 32–33.

11. Результаты экспериментальных исследований производительности измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно подвешенными комбинированными ножами и энергетики процесса измельчения / В.А. Гулевский, А.А. Вертий, Д.Н. Бахарев, С.Ф. Вольвак // Роль аграрной науки в развитии АПК РФ: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежской ГАУ (Россия, Воронеж, 1-2 ноября 2017 г.). Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 220–226.

12. Вертий А.А. Результаты экспериментально-теоретических исследований производительности измельчителя стебельчатых кормов с шарнирно-подвешенными комбинированными ножами / А.А. Вертий // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке: материалы международной научно-практической конференции посвященной 30-летию кафедры технической механики и конструирования машин ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ (Россия, Майский, 24 января 2018 г.). Ч. I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2018. – С. 34–39.

Патент на полезную модель

13. Пат. № 69756 Украина, МПК, В 02 С 18/00, А 01 F 29/00. Измельчитель грубых и стебельчатых кормов / Н.В. Брагинец, Д.М. Бахарев, А.А. Вертий; заявитель и патентообладатель ГБОУ ВО Луганский НАУ, № u 2011 13038; заявл. 07.11.2011; опубл. 10.05.2012. – Бюл. № 9.

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) 224-39-39, 8-900-924-5638, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 12.04.2019г. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага кн.-журн.
П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №19291.
Типография ФГБОУ ВО ВГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.