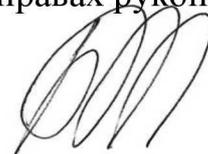


На правах рукописи



ПОПОЛДНЕВ РОДИОН СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный аграрный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Зиганшин Булат Гусманович

Официальные оппоненты:

Курдюмов Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ульяновский государственный
аграрный университет имени П.А. Столыпина»,
заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины
и безопасность жизнедеятельности»;

Брусенков Алексей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Тамбовский
государственный технический университет»,
доцент кафедры «Агроинженерия».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ», г. Москва.

Защита диссертации состоится «29» апреля 2026 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

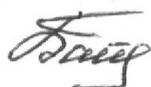
Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве просим указать полные фамилию, имя и отчество, почтовый адрес и адрес электронной почты, наименование организации, ученую степень, ученое звание и должность лица, написавшего отзыв, указать научную специальность, по которой была защищена диссертация, поставить визу, дату и печать организации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=573963>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процесс измельчения кормов является ключевым и наиболее затратным этапом в животноводстве, достигая 60 % от общих энергозатрат и 50 % от экономических расходов на приготовление кормов. Для Республики Татарстан, которая занимает 2-е место в России по производству животноводческой продукции с поголовьем КРС более 360 тыс. голов и объемом производства молока около 2 млн. т/год, эффективность подготовки кормов напрямую влияет на рентабельность отрасли. При этом соблюдение зоотехнических требований к размеру частиц корма (5 – 20 мм) критически важно для продуктивности животных, а снижение энергопотребления измельчения является существенным резервом для повышения экономической эффективности кормоприготовления. В связи с вышеизложенным, разработка энергоэффективного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, обеспечивающего заданное качество корма при снижении энергозатрат и сохранении питательной ценности, является актуальной научно-технической задачей, направленной на повышение экономической эффективности кормоприготовления в животноводстве Республики Татарстан и других регионов России.

Степень разработанности темы. По рассматриваемой теме в отечественной и зарубежной литературе изданы научные труды, регулярно представляются доклады на научных семинарах и конференциях; теоретическими и прикладными исследованиями занимались такие ученые, как В.Р. Алёшкин, А.В. Брусенков, И.Е. Волков, Б.Г. Зиганшин, В.И. Курдюмов, Н.И. Лебедь, С.В. Мельников, Н.Е. Резник, В.И. Сыроватка, Р.А. Смирнов, В.И. Передня, С.И. Рустамов, Л.П. Карташов, И.И. Ревенко, Х.Г. Ишмуратов, А.П. Калашников, В.В. Щеглов, J.G. Welch, P.M. Kennedy, K.H. Südekum, D.R. Mertens и др., внесшие значительный вклад в изучение взаимосвязи физических характеристик корма и эффективности кормления сельскохозяйственных животных. Однако, не достаточно полно исследовались вопросы измельчения клубней картофеля и создания малогабаритных и энергоэффективных измельчителей-смесителей для фермерских хозяйств.

Цель работы. Повышение эффективности работы энергосберегающего измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, обеспечивающего заданное качество измельчения и сохранение питательной ценности кормовой смеси.

Задачи исследования:

- 1) Разработка конструктивно-технологической схемы измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.
- 2) Обоснование параметров рабочего процесса: пропускной способности, энергозатрат, степени измельчения и формы лопастей швырялки.
- 3) Проведение экспериментальных исследований физико-механических свойств картофеля (влажность, трение, работа резания), а также определение влияния режимных и конструктивных параметров (частота вращения, количество ножей, форма лопастей) на эффективность работы измельчителя-смесителя.
- 4) Проведение производственных испытаний измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов в хозяйстве.
- 5) Выполнение технико-экономической и энергетической оценки эффективности разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

Научная новизна работы заключается в комплексной разработке теоретических и конструктивных основ создания энергоэффективного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, обеспечивающего заданное качество кормовой смеси при снижении энергозатрат и сохранении питательной ценности, что подтверждается следующими результатами:

1. Разработана конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов с конической рабочей камерой и многорядным расположением ножей на вертикальном валу, обеспечивающая последовательное уменьшение размера частиц корма в соответствии с зоотехническими требованиями. Техническая новизна подтверждена патентами РФ на изобретения № 2760435, № 2788535 и полезную модель № 230912.

2. Разработана математическая модель процесса измельчения, учитывающая работу резания на каждом ряду ножей, скользящее резание и суммарную мощность привода, и отличающаяся возможностью прогнозирования энергозатрат в зависимости от числа ножей, частоты вращения и физико-механических свойств материала.

3. Получены графоаналитические зависимости, позволяющие определить геометрические и режимные параметры лопасти швырялки выгрузной камеры, обеспечивающую максимальную скорость выгрузки или минимальное время пребывания материала в камере в зависимости от радиуса кривизны и направления изгиба.

4. Получены результаты экспериментальных исследований: уравнения удельной энергоемкости, пропускной способности измельчителя-смесителя и процентного содержания частиц, соответствующих зоотехническим требованиям, в зависимости от частоты вращения ротора при различных комбинациях рабочих органов измельчителя-смесителя.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследований являются основой для совершенствования измельчителей-смесителей корнеклубнеплодов, расчета конструктивно-режимных параметров измельчающих устройств с многорядным расположением горизонтальных ножей на вертикальном валу ротора. Использование разработанного измельчителя-смесителя в фермерских хозяйствах, позволяет повысить на 10 – 15 % производительность труда при подготовке измельченной смеси картофеля и концентрированных кормов, а также снизить на 5 – 10 % энергоемкость рабочего процесса. Расчетный годовой экономический эффект от применения измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов в сравнении с серийным измельчителем корнеплодов К-300 составит 199563 руб/год.

Объектом исследования является процесс измельчения клубней картофеля путем последовательного уменьшения размеров получаемого корма в рабочей камере измельчителя-смесителя.

Предметом исследований являются режимные параметры измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, определяющие его производительность, энергоэффективность и качество конечного продукта.

Методология и методика исследования. Теоретические и экспериментальные исследования процесса измельчения кормов и изучение полученных результатов выполнены методом факторного анализа, методом планирования экспериментов; экспериментальные исследования осуществлялись на основе общих положений проведения научно-исследовательских работ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.
2. Результаты теоретических исследований измельчения корнеклубнеплодов при последовательном уменьшении размеров получаемого корма горизонтальными ножами, с многорядным расположением на вертикальном валу ротора.
3. Результаты теоретического определения энергозатрат при измельчении и обоснования формы лопасти швырялки выгрузной камеры измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.
4. Результаты экспериментальных исследований по обоснованию конструктивно-технологических параметров и режимов работы измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, результатов и выводов диссертационной работы подтверждается применением комплекса взаимодополняющих методов теоретических и экспериментальных исследований, основанных на фундаментальных законах механики и резания, а также использованием аттестованных средств измерений в соответствии с требованиями действующих ГОСТ. Количественное подтверждение адекватности разработанных математических моделей обеспечивается сопоставимостью расчетных и экспериментальных данных с отклонением не более 15 %, высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0,85$) при аппроксимации зависимостей и практическим достижением в производственных условиях заявленных

показателей по повышению производительности труда на 10 – 15 % и снижению энергоемкости процесса на 5 – 10 %.

Основные положения и выводы диссертации были представлены и обсуждались на международных конференциях: «Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса» (Казань, 2021); «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы» (Казань, 2021); «Научное сопровождение технологий агропромышленного комплекса: теория, практика, инновации» (Казань, 2023); «IOP Conference Series: Earth and Environmental Science» (Bristol, 2023); на всероссийских конференциях: «Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия» (Москва, 2020); «Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты» (Нальчик, 2021); «Современные достижения аграрной науки» (Казань, 2021); «Современное состояние и перспективы развития технической базы АПК», (Казань, 2023, 2024).

Личное участие соискателя заключается в выполнении полного цикла исследований: анализ научно-технической проблемы и выявление перспективного направления, теоретическое обоснование параметров измельчителя-смесителя, разработка методик и проведение экспериментов, анализ данных, технико-экономическая оценка, формулировка выводов и рекомендаций. На основе этих исследований получены три патента РФ (№ 2760435, № 2788535, № 230912). Участие соавторов отражено в совместных публикациях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует п. 2 «Теория и методы технологического воздействия на объекты сельскохозяйственного производства (почву, растения, животных, зерно, молоко и др.)» (пункты 2, 3 научной новизны), п. 4 «Механизированные, автоматизированные и роботизированные технологии и технические средства для агропромышленного комплекса» (пункт 1 научной новизны) и п. 6 «Методы и средства оптимизации технологий, параметров и режимов работы машин и оборудования» (пункт 4 научной новизны) паспорта научной специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК, 1 статья в издании, входящем в международную базу данных Scopus, 3 патента, 9 работ в прочих изданиях.

Структуры и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, включает 18 таблиц, 46 рисунков, список литературы содержит 142 наименования цитируемых работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, ее новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы объект, предмет и методология исследования, дана краткая характеристика работы, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор конструкций существующих измельчителей корнеклубнеплодов. Выявлено, что применяемое оборудование не обеспечивает требуемого размера и однородности измельченного корма, ведет к потерям питательных веществ, а также характеризуется высокой энергоемкостью, что ограничивает его эффективное применение в условиях крестьянско-фермерских хозяйств. Выполнен анализ патентных решений и научных работ, посвященных влиянию степени измельчения на поедаемость и усвояемость кормов (В.М. Косолапов, Х.Г. Ишмуратов, А.П. Калашников, Н.И. Плясов, В.В. Щеглов, И.А. Егоров, J.G. Welch и др.), а также теоретических основ процесса измельчения, разработанных в трудах В.П. Горячкина, В.А. Желиговского, С.М. Мельникова, Н.Е. Резник, И.Е. Волкова, П.А. Савиных, П.Р. Риттингер и Ф.С. Бонд, чьи работы легли в основу современных методов расчета энергоемкости процесса.

Во второй главе приведены теоретические предпосылки оптимизации затрат на измельчение кормов и теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров. Разработанный измельчитель-смеситель корнеклубнеплодов содержит рабочую камеру 1 с приемным бункером 2, измельчающие ножи 3 на валу 4, поворотные направляющие пластины 5 и противорезы 6 на внутренней поверхности рабочей камеры, выгрузную камеру 7 с

размещенной в ней лопастной швырлякой 8 и электродвигатель 9 (рис.1). Для определения основных конструктивных и технологических параметров рассмотрим кинетику процесса измельчения материала, основываясь на работах Мельникова С.В., Алешкина В.Р. и др., применивших теорию марковских случайных процессов.

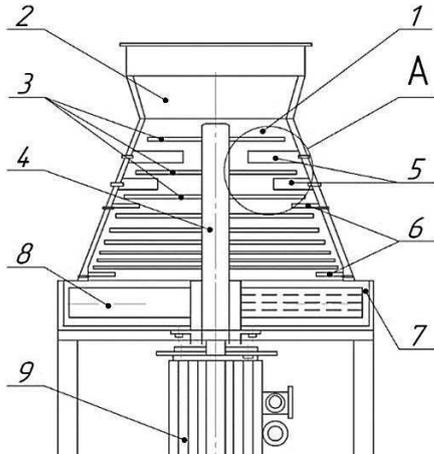


Рисунок 1 – Схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов: 1 – камера измельчения; 2 – бункер приемный; 3 – ножи измельчающие; 4 – вал ротора; 5 – поворотные направляющие пластины; 6 – противорезы; 7 – камера выгрузная; 8 – швырляка лопастная; 9 – электродвигатель

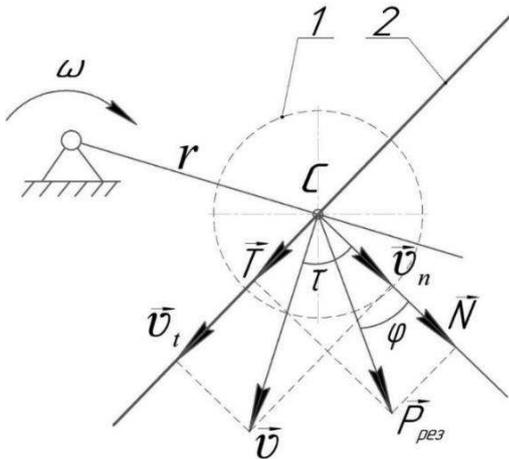


Рисунок 2 – Схема разложения сил резания на составляющие: 1 – горловина приемного бункера; 2 – нож измельчающий

Момент сил резания складывается из суммы моментов их составляющих:

$$M_{рез} = Tr \sin(\tau) + Nr \cos(\tau) = Nr \cos(\tau)(1 + f' \operatorname{tg}(\tau)), \quad (4)$$

где $M_{рез}$ – момент сил резания; \vec{N} – нормальная составляющая силы резания, перпендикулярная к линии ножа, Н; \vec{T} – касательная составляющая, Н; r – расстояние от точки резания до оси вращения ножа, м; τ – угол скользкого резания, град; f' – коэффициент скользкого резания.

С учетом выражения (4) и величины нормальной составляющей силы резания, мощность силы резания определяется по формуле:

$$W_{рез} = M_{рез} \omega = q \Delta l r \omega \cos(\tau)(1 + f' \operatorname{tg}(\tau)), \quad (5)$$

где $W_{рез}$ – мощность силы резания; q – удельная линейная сила ножа, Н/м; Δl – длина нагруженной части лезвия, м.

Величина удельной энергоёмкости процесса определяется:

$$E_{уд} = W/Q, \quad (1)$$

где $E_{уд}$ – удельная энергоёмкость кВт·с/кг; W – мощность, подводимая к ротору измельчителя-смесителя, кВт; Q – производительность измельчителя-смесителя, кг/с.

Производительность разрабатываемого измельчителя-смесителя определяется:

$$Q = k_0 \rho v_0 S, \quad (2)$$

где k_0 – коэффициент заполнения сечения горловины материалом; ρ – плотность исходного материала, кг/м³; v_0 – скорость подачи, м/с; S – площадь поперечного сечения горловины приемного бункера, м².

Степень измельчения зависит от количества ножей, частоты их вращения и скорости перемещения материала в осевом направлении камеры:

$$n = \frac{v_0 \pi d_K}{\omega}, \quad (3)$$

где n – степень измельчения; v_0 – скорости подачи, м/с; π – угол, соответствующий половине оборота двойного ножа на верхнем уровне, рад; d_K – средний размер частиц на выходе из измельчителя, м; ω – угловая скорость ротора с ножами, рад/с.

Для определения энергозатрат при резании исходного материала ножом рассмотрим схему их силового взаимодействия (рис. 2).

Для дальнейшего расчета примем ряд допущений: каждый ряд ножей при воздействии на каждую частицу разрезает ее на две части, так что средняя длина частиц уменьшается, а количество частиц, переходящих на следующий ряд ножей увеличивается в два раза, при этом площадь материала, которую необходимо разрезать – удваивается.

Задавая индивидуально степень измельчения на каждой ступени, выражение для определения работы резания на каждом ряде ножей для одного ножа в ряду примет вид:

$$A_i = A_{y\partial} k_0 S \prod_1^{i-1} u_i = q_i (1 + f' \operatorname{tg}(\tau_i)) k_0 S \prod_1^{i-1} u_i, \quad (6)$$

где A_i – работа резания на каждом ряде ножей для одного ножа в ряду; $A_{y\partial}$ – работа, отнесенная к единице площади среза; k_0 – коэффициент заполнения сечения горловины материалом; S – площадь материала, которую прорезает лезвие ножа первого ряда, м^2 ; $\prod_1^{i-1} u_i$ – произведение степеней измельчения u_i на каждом ряде ножей с первого до предыдущего u_{i-1} ; i – порядковый номер ряда ножей; k – количество рядов ножей, шт.

За один оборот ротора в камеру измельчения поступает порция материала от двух ножей верхнего ряда, следовательно, суммарная работа всех ножей за один оборот будет равна:

$$A_{\text{сум}} = 2 \sum_{i=1}^k A_i, \quad (7)$$

где $A_{\text{сум}}$ – суммарная работа всех ножей за один оборот.

Средняя мощность W , подводимая к ротору, определяется как сумма мощностей резания, разгона материала и холостого хода:

$$W = W_{\text{рез}}^{\text{сум}} + W_M + W_{\text{ХХ}}, \quad (8)$$

где $W_{\text{рез}}^{\text{сум}}$ – мощность сил резания; W_M – мощность на разгон материала; $W_{\text{ХХ}}$ – мощность на холостой ход, $W_{\text{ХХ}} = (0,15 \dots 0,2)(W_{\text{рез}}^{\text{сум}} + W_M)$.

Мощность сил резания:

$$W_{\text{рез}}^{\text{сум}} = \frac{A_{\text{сум}}}{t} = \frac{\omega}{\pi} \sum_{i=1}^k A_i, \quad (9)$$

где k – количество рядов ножей, $k = (3 \dots 9)$; t – время одного оборота ротора.

Мощность на разгон материала:

$$W_M = \frac{dK}{dt} \omega = Q r_k^2 \omega^2. \quad (10)$$

Обоснование радиуса кривизны и направления изгиба лопасти швырялки выгрузной камеры выполнялось при условии, что в процессе резания уплотнение материала не сопровождается сопротивлением входу следующей порции в камеру измельчения при установившемся режиме работы.

Рассмотрим движение в горизонтальной плоскости совокупности массы измельченного корма, взаимодействующей с лопастью швырялки выгрузной камеры (рис. 3).

Заданные значения угловой скорости, начального и конечного расстояния от оси ротора считаем определенными по обоснованию процесса резания ножами на том же валу. Для составления уравнений движения используем теорему о движении центра масс в относительном движении:

$$m \vec{W} = m \vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c, \quad (11)$$

где m – масса порции материала, захватываемого лопастью; \vec{W} – ускорение в относительном движении по лопасти; $m \vec{g}$ – сила тяжести, направленная вертикально вдоль оси вращения лопасти; \vec{N}_1 – нормальная реакция лопасти; \vec{N}_2 – нормальная реакция горизонтальных поверхностей лопасти (дополнительных ножей на лопасти); \vec{F}_1 – сила трения, обусловленная нормальной реакцией \vec{N}_1 ; \vec{F}_2 – сила трения, обусловленная

нормальной реакцией \vec{N}_2 ; $\vec{\Phi}_e$ – переносная центробежная сила инерции; $\vec{\Phi}_C$ – кориолисова сила инерции.

Для лопаток, загнутых по направлению вращения, нормальная реакция \vec{N}_1 направлена в сторону вогнутости траектории на центр кривизны O_1 (рис. 3).

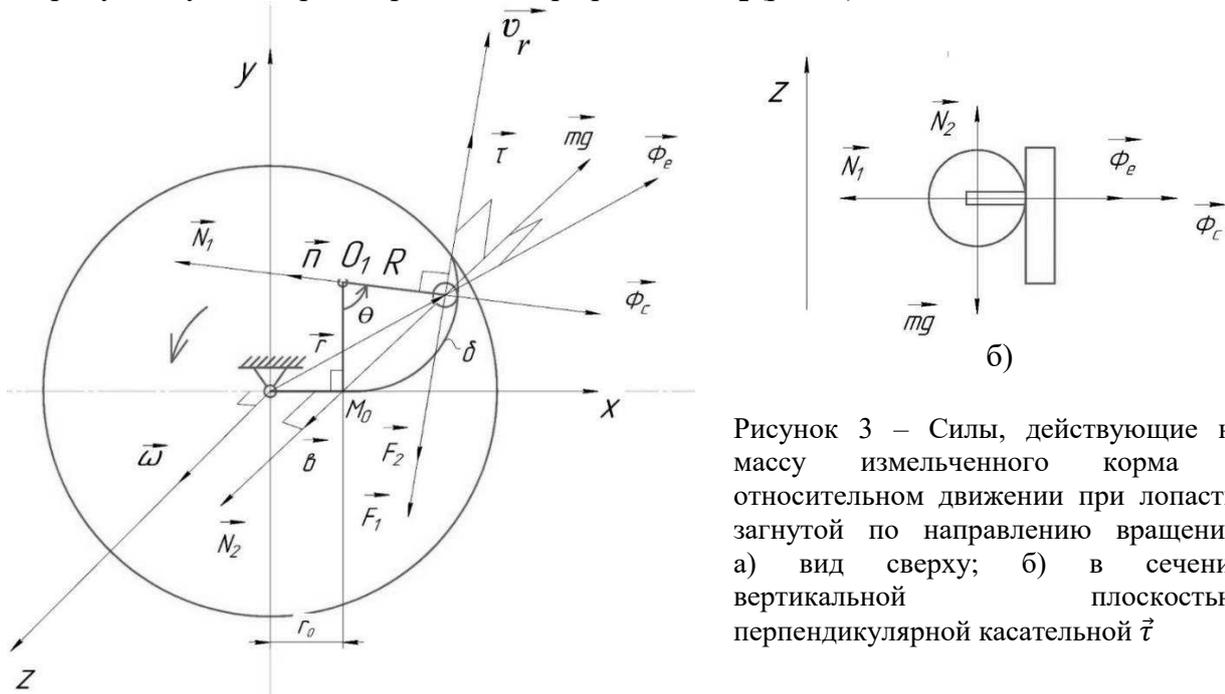


Рисунок 3 – Силы, действующие на массу измельченного корма в относительном движении при лопасти, загнутой по направлению вращения: а) вид сверху; б) в сечении вертикальной перпендикулярной касательной $\vec{\tau}$

Спроецируем уравнение (11) на естественные оси координат ($\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b}$) с учетом величин касательного $W_\tau = \dot{\sigma}$, нормального $W_n = \frac{\dot{\sigma}^2}{R}$ ускорений и направления \vec{N}_1 :

$$\begin{cases} m\ddot{\sigma} = \Phi_{e\tau} - F_1 - F_2; \\ m\frac{\dot{\sigma}^2}{R} = \Phi_{en} + N_1 - \Phi_C; \\ 0 = N_2 - mg, \end{cases} \quad (12)$$

где R – радиус кривизны лопасти.

Отсчет траектории ($\sigma = 0$) начнем от начального положения частицы (точка M_0), на оси x радиус от оси вращения $r = r_0$. Декартовы оси (x, y) вращаются вместе с лопастью с угловой скоростью ω против хода часовой стрелки вокруг оси z .

Проведя ряд преобразований получим дифференциальные уравнения движения:

$$\begin{cases} \ddot{\sigma} = \omega^2 \left(r_0 + R \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + \omega^2 \left(R - R \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) - \frac{N_1}{m} f - \frac{N_2}{m} f; \\ \frac{N_1}{m} = \frac{\dot{\sigma}^2}{R} + \left(r_0 + R \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) - \omega^2 \left(R - R \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + 2\omega\dot{\sigma}; \\ \frac{N_2}{m} = g, \end{cases} \quad (13)$$

где $\frac{\sigma}{R}$ – центральный угол при движении по окружности.

Из второго и третьего уравнений определяем $\frac{N_1}{m}$ и $\frac{N_2}{m}$, получаем одно дифференциальное уравнение второго порядка, которое решалось численно в алгоритмической программе на языке С# в среде Microsoft Visual Studio. Зависимости от времени $\sigma(t)$, $N_1(t)$, а также величина абсолютной скорости $v_a(t)$ массы m :

$$v_a = \sqrt{v_{ar}^2 + v_{a\varphi}^2}, \quad (14)$$

где v_{ar} – радиальная, $v_{a\varphi}$ – трансверсальная скорости центра масс;

$$v_{ar} = \dot{r} = \dot{\sigma} \cos(\theta); \quad (15)$$

$$v_{a\varphi} = \omega r + \dot{\sigma} \sin(\theta), \quad (16)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – длина радиус-вектора центра масс.

Представим лопасть швырялки той же кривизны, но загнутую в противоположную сторону. Спроецируем силы, действующие на материал на естественные оси координат с учетом изменения направления кориолисовой силы $\vec{\Phi}_C$, угловой скорости $\vec{\omega}$ и направления нормальной реакции \vec{N}_1 , так как масса перемещается по выпуклой стороне лопасти:

$$\begin{cases} m\ddot{\sigma} = \Phi_{e\tau} - F_1 - F_2; \\ m\frac{\dot{\sigma}^2}{R} = \Phi_{en} - N_1 + \Phi_C; \\ 0 = N_2 - mg. \end{cases} \quad (17)$$

Подставив величины сил и выразив неизвестные величины получим:

$$\begin{cases} \ddot{\sigma} = \omega^2 \left(r_0 + R \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + \omega^2 \left(R - R \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) - \frac{N_1}{m} f - \frac{N_2}{m} f; \\ \frac{N_1}{m} = -\frac{\dot{\sigma}^2}{R} - \left(r_0 + R \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) + \omega^2 \left(R - R \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + 2\omega\dot{\sigma}; \\ \frac{N_2}{m} = g. \end{cases} \quad (18)$$

Добавим решение уравнений (18) в программу численного решения как альтернативный вариант изгиба лопаток, при этом абсолютная скорость по выражению (14) имеет составляющие, равные

$$v_{ar} = \dot{r} = \dot{\sigma} \cos(\theta); \quad (19)$$

$$v_{a\varphi} = \omega r - \dot{\sigma} \sin(\theta). \quad (20)$$

Знак минус у второго слагаемого в выражении (20) есть следствие тупого угла между относительной и переносной скоростями.

По результатам численного решения дифференциальных уравнений (13) и (18) в алгоритмической программе на языке C# в среде Microsoft Visual Studio получены графические зависимости, построенные в Microsoft Excel (рис. 4 и 5).

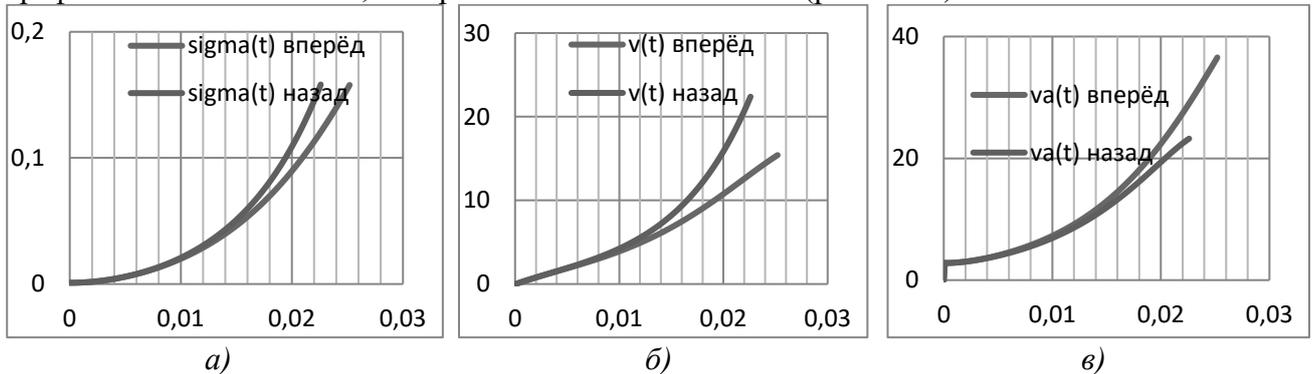


Рисунок 4 – Расчетные значения перемещений: а) относительных скоростей; б) абсолютных скоростей; в) по времени (t) при $\omega = 156 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $r_0 = 0,018 \text{ м}$, $r_k = 0,165 \text{ м}$, $R = 0,15 \text{ м}$, $f = 0,3$

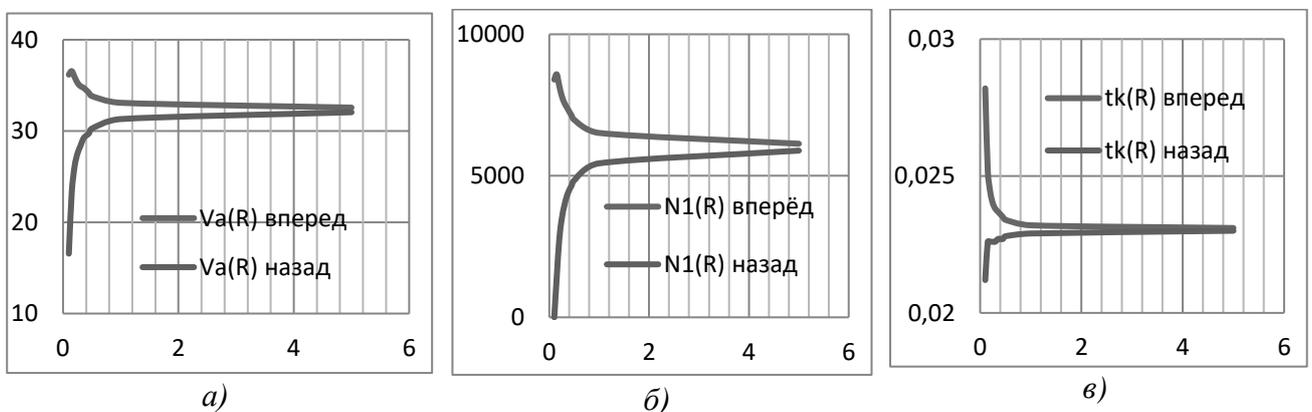


Рисунок 5 – Зависимости конечных расчетных значений: а) абсолютной скорости $v_a(R)$; б) нормальной реакции $N_1(R)$; в) времени движения по лопасти $t_k(R)$ от радиуса кривизны лопасти (R) при $\omega = 156 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $r_0 = 0,018 \text{ м}$, конечном радиусе $r_k = 0,165 \text{ м}$ и $f = 0,3$

Для лопасти, загнутой против направления вращения, при $R = 0,1$ и менее, конечный радиус $r_k = 0,165$ м не достигается на поверхности лопасти из-за отрыва массы от неё, что проявляется обращением в нуль нормальной реакции N_1 . Этот эффект обусловлен действием центробежной силы $\vec{\Phi}_e$. При загибе лопасти по направлению вращения для $R < 0,0824$ м (и указанных выше параметрах) происходит остановка в относительном движении ($\dot{\sigma} = 0$) из-за возрастания нормальной реакции N_1 и связанной с ней силы трения F_1 .

В результате теоретических исследований получены аналитические выражения по определению работы резания на каждом ряде ножей и суммарной мощности привода измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. По результатам численного решения дифференциальных уравнений получены графические зависимости, позволяющие определить геометрические и режимные параметры лопастей швырялки выгрузной камеры.

В третьей главе изложена общая программа и методика экспериментальных исследований, представлены лабораторные установки, приборы и измерительная аппаратура, применяемые в ходе исследований, описана лабораторно-производственная установка измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

Исследования проводились в лаборатории кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе» ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет». Лабораторно-производственная установка (рис. 6) состоит из измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, переносного измерительного комплекта К-50, частотного преобразователя, классификатора со сменными решетками, комбинированного тахометра МЕГЕОН, весов лабораторных ВК-600.1 и весов электронных Universal Mart. Для измерения исходного размера клубней использовали штангенциркуль. Для выполнения экспериментов были изготовлены сменные рабочие органы для лабораторно-производственной установки (рис. 6). Экспериментальные исследования проведены в соответствии с действующими ГОСТ Р 54951-2012, ГОСТ Р 52812-2007, ГОСТ Р 54783-2011, общепринятыми и частными методиками ГОСТ ISO 6498-2014, ГОСТ 7194-81, обеспечивающими получение первичной информации в виде реализаций случайных процессов с последующей их обработкой на персональном компьютере при помощи пакета программ «MS Excel».

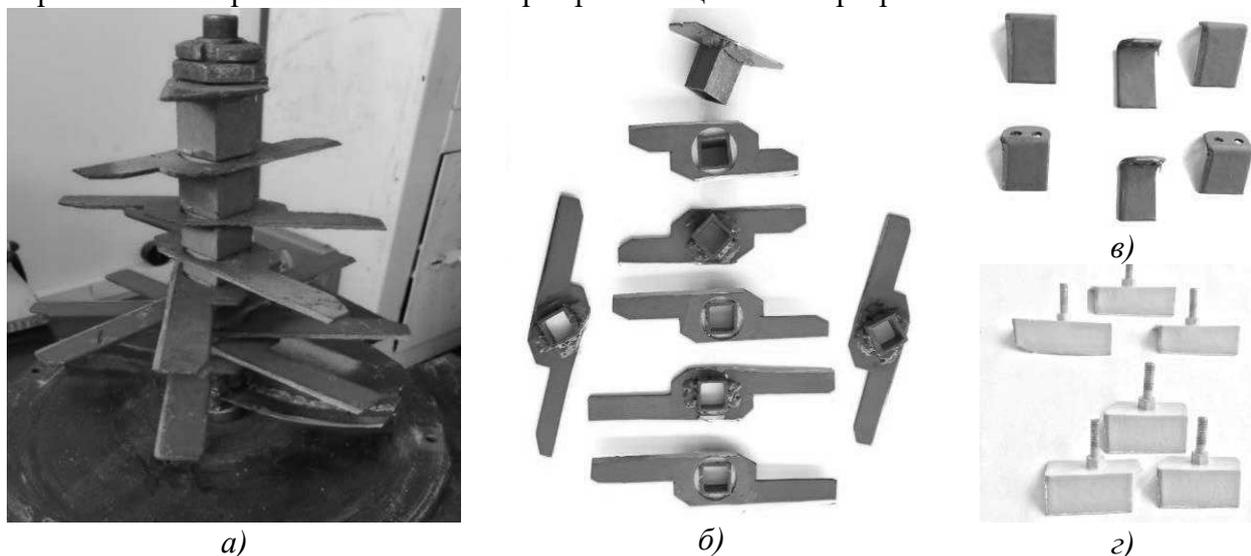


Рисунок 6 – Рабочие органы измельчителя-смесителя: а) ротор в сборе; б) измельчающие ножи; в) противорезающие ножи; г) направляющие пластины

В четвертой главе приведены результаты исследований и определены конструктивно-технологические параметры измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. Для проверки адекватности теоретических положений и математических зависимостей согласно разработанной программе проведены исследования, направленные на обоснование конструктивно-технологических и режимных параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. Результаты экспериментальных исследований влияния толщины лезвий ножа на затраты энергии приведены в виде графика (рис. 7). Полученный график демонстрирует прямую зависимость

удельной работы резания от толщины лезвия. При увеличении толщины лезвия от 1 мм до 5 мм удельная работа резания возрастает более чем в 22 раза.

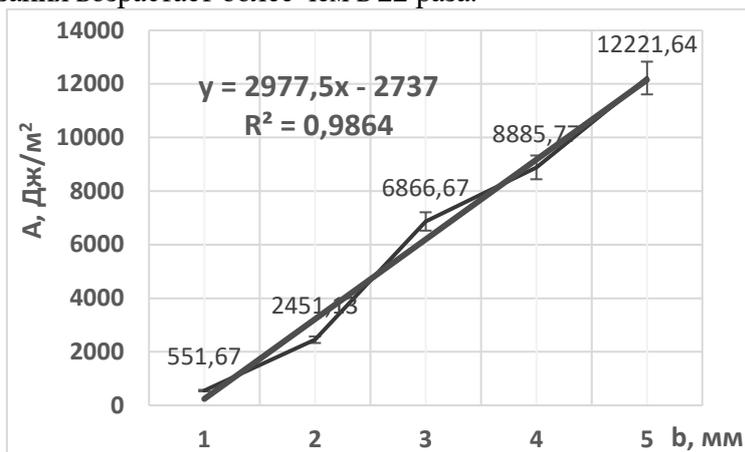


Рисунок 7 – Зависимость удельной работы резания клубней картофеля от толщины лезвия ножа

Результаты экспериментов по определению удельного расхода энергии и пропускной способности от частоты вращения ротора представлены графическими зависимостями (рис. 8). Результаты обрабатывались в программе Microsoft Excel с помощью функции «сглаживание».

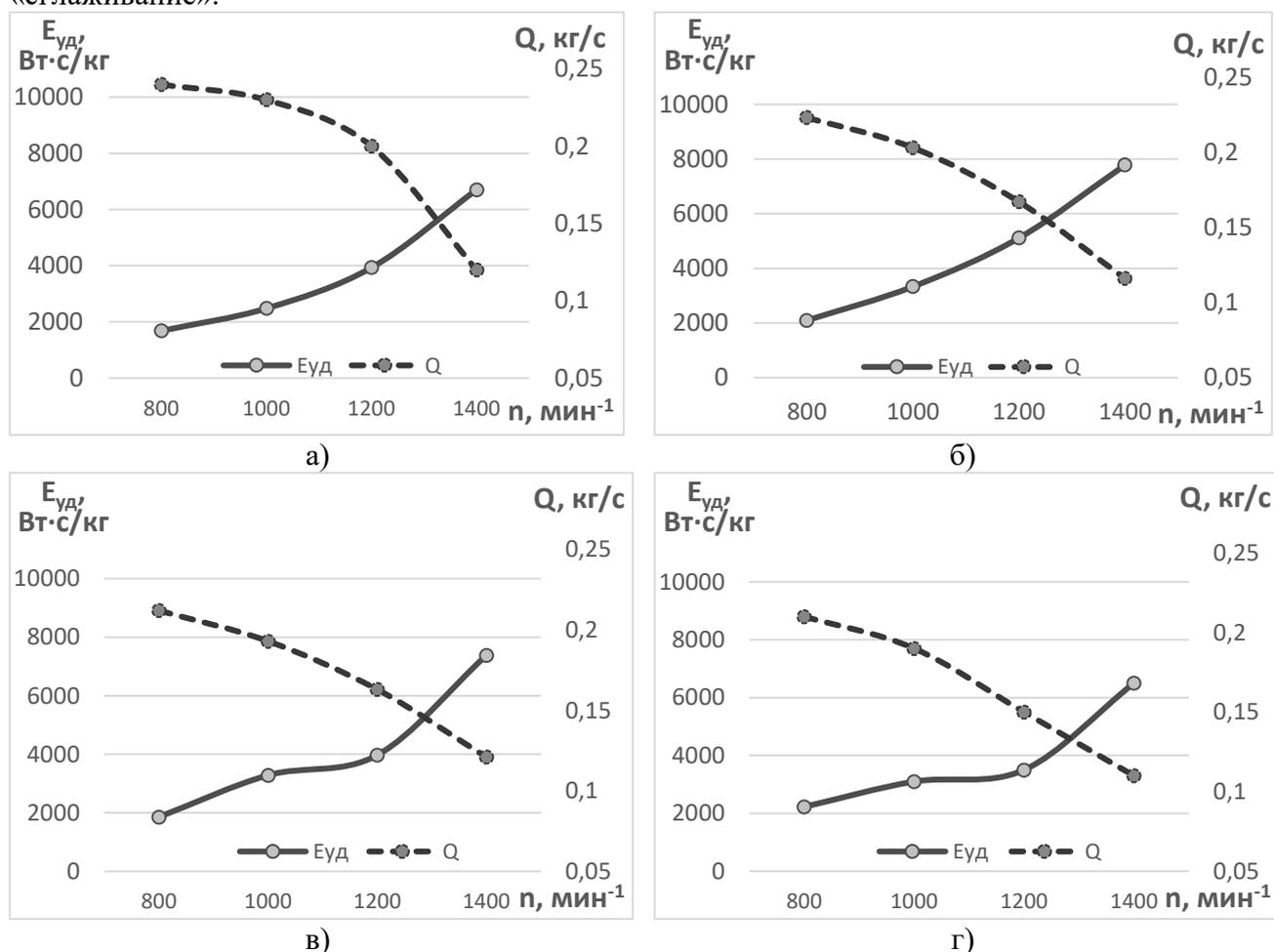


Рисунок 8 – Зависимости удельной энергоёмкости и пропускной способности измельчителя-смесителя от частоты вращения ротора: а) с 7-ю рядами ножей и лопастью швырляки, загнутой против направления вращения; б) с 7-ю рядами ножей и лопастью швырляки по направлению вращения; в) с 8-ю рядами ножей и лопастью швырляки по направлению вращения; г) с 8-ю рядами ножей и лопастью швырляки, загнутой против направления вращения

Увеличение частоты вращения выше 1200 мин^{-1} приводит к значительному росту удельной энергоемкости, что выражается в экспоненциальном увеличении потребления энергии. Одновременно с ростом энергозатрат, наблюдается снижение производительности (Q) при увеличении частоты вращения. Это говорит о том, что попытка ускорить процессы измельчения и смешивания путем повышения частоты вращения приводит к обратному эффекту – снижению эффективности и увеличению энергетических потерь.

Целью дальнейшего анализа результатов экспериментальных данных являлось выявление зависимостей выходных параметров, оценивающих качество конечного продукта: степень измельчения и однородность измельченного корма от частоты вращения, количества рядов измельчающих ножей и направления лопастей швырляки выгрузной камеры (рис. 9).

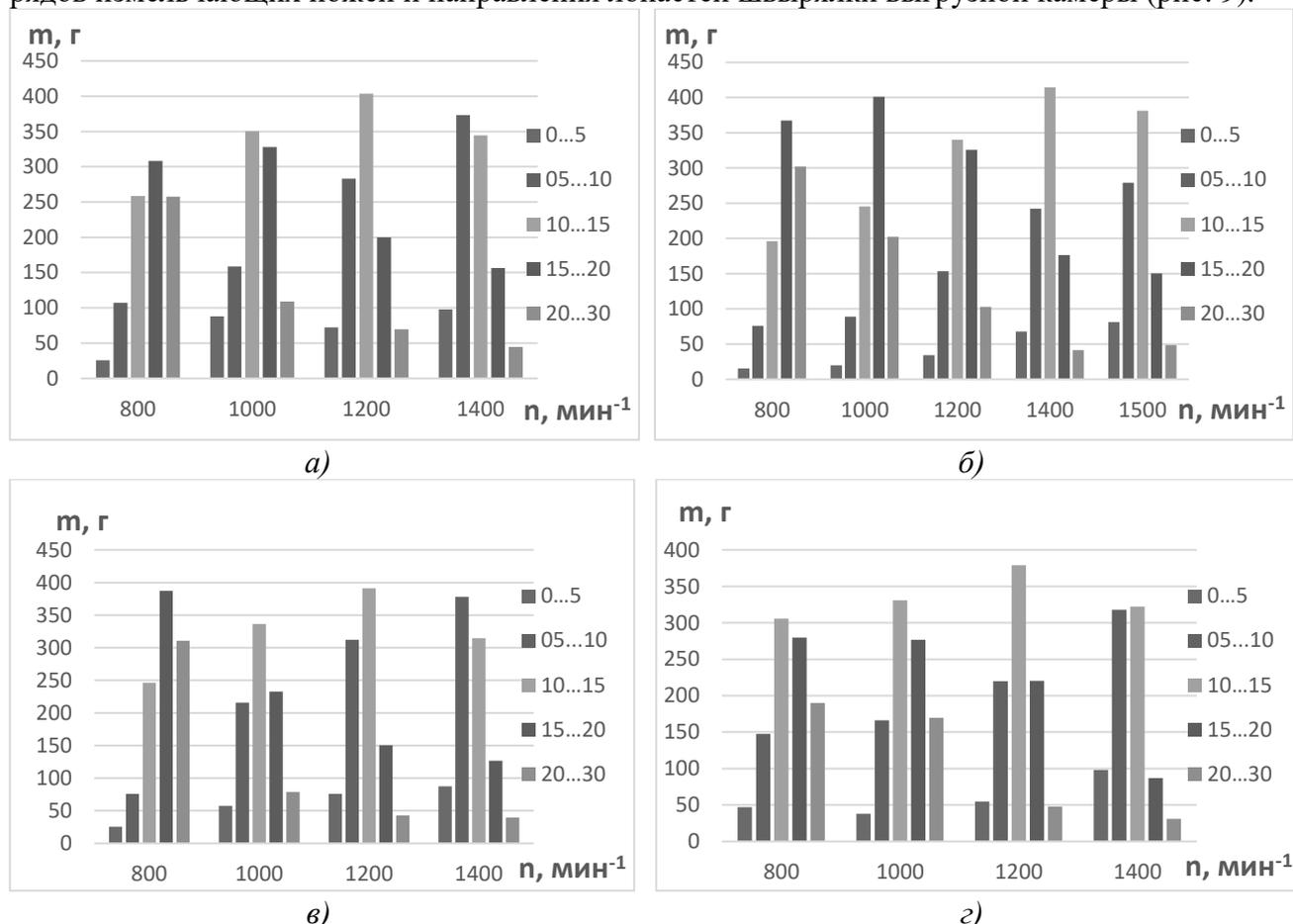


Рисунок 9 – Зависимости размеров фракций измельченного продукта от частоты вращения ротора: а) с 7-ю рядами ножей и лопастью швырляки, загнутой против направления вращения; б) с 7-ю рядами ножей и лопастью швырляки по направлению вращения; в) с 8-ю рядами ножей и лопастью швырляки по направлению вращения; г) с 8-ю рядами ножей и лопастью швырляки, загнутой против направления вращения

Графики изменения фракционного состава измельченного продукта свидетельствуют, что с ростом частоты вращения ротора увеличивается степень измельчения и доля мелких фракций (0 – 5 мм), при этом снижается доля крупных фракций (20 – 30 мм). Этот эффект обусловлен более интенсивным измельчением материала на высоких скоростях.

Степень измельчения и однородность не могут быть показателями критерия эффективности работы машины. Поэтому необходимо проанализировать влияние конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя на показатель, оценивающий процентное содержание частиц размером 5 – 20 мм, являющееся наиболее подходящим по зоотехническим требованиям для всех животных в смеси с другими кормами. Для этой цели построены графики, показывающие изменение процентного содержания частиц размером 5 – 20 мм в общей массе готового продукта от частоты

вращения ротора при различных комбинациях рабочих органов измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (рис. 10).

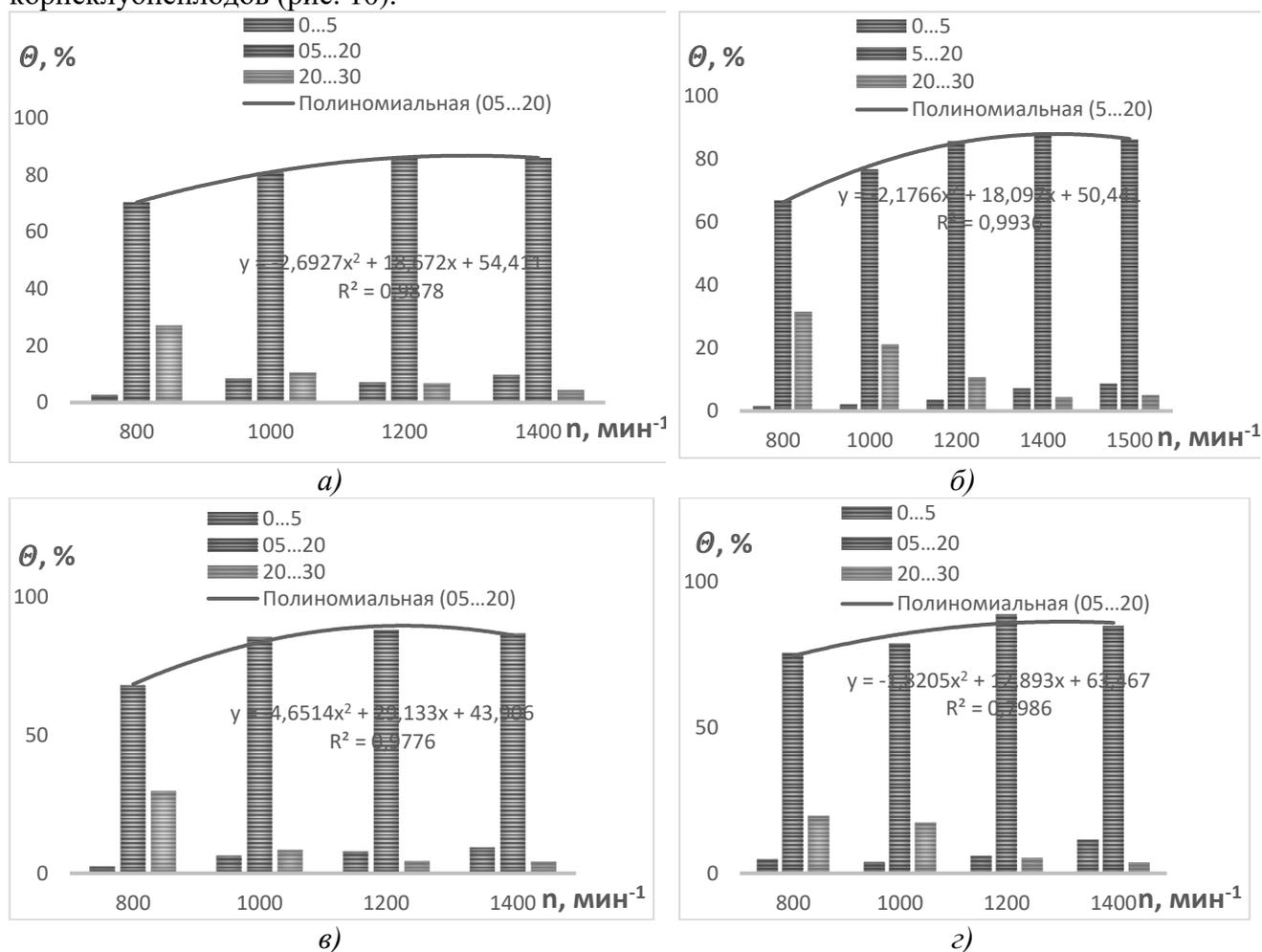


Рисунок 10 – Зависимость процентного содержания частиц размером 5 – 20 мм в общей массе измельченного продукта от частоты вращения ротора: а) с 7-ю рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой против направления вращения; б) с 7-ю рядами ножей и лопастью швырялки по направлению вращения; в) с 8-ю рядами ножей и лопастью швырялки по направлению вращения; г) с 8-ю рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой против направления вращения

Анализ диаграмм позволяет сделать вывод, что лучшие показатели процентного содержания частиц размером 5 – 20 мм достигаются при частоте вращения ротора 1200 мин⁻¹, наивысшее значение (88,87 %) при комбинации рабочих органов с 8-ю рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой против направления вращения ротора.

Согласно методики, процент выделившегося сока (x) при измельчении картофеля принят в качестве потерь (рис. 12). Представленный график наглядно демонстрирует тенденцию к увеличению потерь сока с ростом частоты вращения.

При частотах вращения 800-1200 мин⁻¹ потери сока находятся в пределах допустимых значений (1,9 – 2,3 %). Однако, при частоте 1400 мин⁻¹ потери приближаются к верхнему пределу, указанному в литературных источниках (6 %), что может негативно сказаться на качестве конечного продукта.

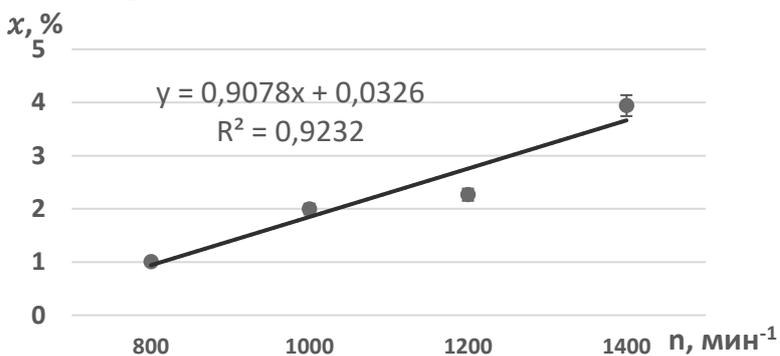


Рисунок 12 – Зависимость потерь сока от частоты вращения ротора

В пятой главе приведены результаты производственных испытаний и комплексной оценки эффективности работы созданного измельчителя-смесителя, которые показали, что при производительности 0,42 – 0,58 т/ч агрегат обеспечивает степень измельчения 4,5, однородность корма 90 % и потери сока на уровне 2,1 %, а сравнительный анализ с серийным измельчителем корнеплодов К-300 подтвердил снижение энергоемкости процесса на 5 – 10 %, повышение производительности труда на 10 – 15 % и расчетный годовой экономический эффект 199,6 тыс. руб./год, что в совокупности доказывает достижение цели диссертационной работы по повышению эффективности приготовления кормов в условиях малых фермерских хозяйств.

Рекомендации для производства. Для повышения эффективности приготовления кормов в условиях малых фермерских хозяйств рекомендуется внедрение разработанного измельчителя-смесителя с работой при частоте вращения ротора 1200 мин⁻¹ с использованием 8 рядов ножей и лопасти швырляки, загнутой против направления вращения ротора, что обеспечивает содержание целевой фракции корма 5 – 20 мм до 88 % при снижении энергозатрат на 5 – 10%, при этом для сохранения питательной ценности измельчение корнеклубнеплодов следует проводить непосредственно перед скармливанием (не более чем за 1,5 – 2 часа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведенных исследований была разработана и научно обоснована конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. Установлено, что эффективность рабочего процесса определяется комплексом факторов: числом оборотов ротора с режущими ножами; количеством, размером и формой ножей; площадью, описываемой ножами за один оборот; углом наклона и количеством направляющих пластин; а также количеством и размером противорежущих элементов. Технические решения защищены патентами РФ на изобретения № 2760435, № 2788535 и полезную модель № 230912.

2. В результате теоретического анализа процесса измельчения получены аналитические выражения для определения производительности измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. Производительность составляет 0,3...1,4 т/ч при заданных зоотехнических требованиях, угловой скорости ротора измельчителя-смесителя $\omega = 83,7...157 \text{ с}^{-1}$. Установлено, что энергоемкость зависит от конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя: количества и параметров измельчающих и противорежущих ножей, частоты вращения ротора и радиуса кривизны лопасти швырляки. Расчетным путем установлено, что мощность на привод измельчителя-смесителя изменяется 1,15...6,9 кВт·с/кг. Получены аналитические выражения по определению работы резания на каждом ряде ножей для одного ножа в ряду и суммарной работы всех ножей за один оборот. Для обеспечения минимального времени пребывания материала на лопасти швырляки и его эффективной выгрузки при $\omega = 156 \text{ с}^{-1}$, $r_0 = 0,018 \text{ м}$, $r_k = 0,165 \text{ м}$, $f = 0,3$ следует выполнить лопасть загнутой против направления вращения и радиусом кривизны $R = 0,15 \text{ м}$.

3. Экспериментально получены уравнения процентного содержания частиц (5...20 мм) в зависимости от частоты вращения ротора при различных комбинациях рабочих органов измельчителя-смесителя. Сравнение полученных экспериментальных значений с литературными данными показывает, что при частотах вращения ротора 1000-1200 мин⁻¹ потери сока находятся в пределах допустимых значений (1,9...2,7%). Экспериментальные исследования показали, что увеличение толщины лезвия на 1 мм приводит к 4,4-кратному росту удельной работы резания.

4. Производственные испытания в КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна подтвердили работоспособность устройства и его эффективность при измельчении клубней картофеля, продемонстрировав производительность до 0,58 т/ч при высокой степени измельчения (4,5), однородности продукта (до 90%) и низкой потери сока (не более 2,1%).

5. Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, что выразилось в значительном снижении энергозатрат на 59,5-77,5% при росте энергетической эффективности на 146,2%, а также в уменьшении себестоимости работ на 40,26% с годовым экономическим эффектом 199563 рублей и сроком окупаемости 0,16 лет.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с адаптацией конструкции для других видов сочных кормов (тыква, свекла, кабачки) и сыпучих компонентов (зерно, жмых), разработкой модуля автоматического дозирования и смешивания различных ингредиентов в заданных пропорциях.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК

1. Обоснование параметров измельчителя кормов / Б. Г. Зиганшин, П. В. Зайцев, Д. Т. Халиуллин, И.Х. Гайфуллин, Е.И. Байгильдеева, **Р.С. Пополднев** // Вестник Курганской ГСХА. – 2023. – № 1(45). – С. 69-77.

2. Усовершенствованный измельчитель кормов / Д.Т. Халиуллин, Ю.Х. Шогенов, Б.Г. Зиганшин, **Р.С.Пополднев** [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 11(317). – С. 28-31.

3. Определение энергоёмкости процесса измельчения резанием в измельчителе кормов / **Р. С. Пополднев**, Б. Г. Зиганшин, А. В. Алешкин [и др.] // Вестник Казанского ГАУ. – 2023. – Т. 18, № 4(72). – С. 82-88.

Статья в научном издании, индексируемом базой данных Scopus

4. Ways to increase the efficiency of using agricultural machinery in performing technological operations / D. T. Khaliullin, A. V. Belinsky, I. Kh. Gayfullin, **R.S. Popoldnev** [et al.] // Iop Conference Series Earth and Environmental Science. Vol. 1212, Bristol, 2023. – P. 12055.

Патенты

5. Пат. 2760435 Российская Федерация, МПК А01F 29/02 (2021.08). Измельчитель-смеситель кормов / Зиганшин Б. Г., Дмитриев А. В., Халиуллин Д. Т., **Пополднев Р.С.** [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Казанский ГАУ". – № 2021106282: заявл. 10.03.202: опубл. 25.11.2021, Бюл. № 33. – 7 с.

6. Пат. 2788535 Российская Федерация, МПК А01F 29/00 (2022.08). Измельчитель-смеситель кормов / **Пополднев Р.С.**, Зиганшин Б. Г., Дмитриев А. В. [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО "Казанский ГАУ". – № 2022105492: заявл. 28.02.2022: опубл. 23.01.2023, Бюл. № 3. – 7 с.

7. Пат. 230912 Российская Федерация, МПК А01F 29/00 (2024.08). Измельчитель-смеситель кормов / Халиуллин Д. Т., Гайфуллин И. Х., Зиганшин Б. Г., **Пополднев Р.С.** [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Казанский ГАУ". – № 2024132912: заявл. 01.11.2024: опубл. 24.12.2024, Бюл. 36. – 7 с.

Труды в прочих изданиях

8. **Пополднев Р.С.** Анализ конструкций измельчителей кормов / Р.С. Пополднев, Г.В. Алексеева, Д.Т. Халиуллин // Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия. Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2020. – С. 681-685.

9. **Пополднев Р.С.** Анализ конструкций измельчителей кормов/ Р.С. Пополднев, Г.В. Алексеева, Д.Т. Халиуллин // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты. Сборник научных трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Нальчик, 2021. – С. 111-114.

10. Зиганшин Б.Г. Разработка конструкции измельчителя-смесителя кормов / Б. Г. Зиганшин, А. В. Дмитриев, Д. Т. Халиуллин, **Р. С. Пополднев** // Современные достижения аграрной науки: Научные труды всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора Гайнанова Х.С. Том 1. – Казань: Казанский ГАУ, 2021. – С. 121-126.

11. Сабиров, Б. М. Разработка дробилки кормов лопастного типа / Б. М. Сабиров, **Р. С. Пополднев** // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: Научные труды Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мудрова П.Г. – Казань: Казанский ГАУ, 2021. – С. 380-385.

12. **Пополднев, Р. С.** Обзор конструкций измельчителей кормов / Р. С. Пополднев, Б. М. Сабиров // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: Научные труды Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мудрова П.Г. – Казань: Казанский ГАУ, 2021. – С. 13-22.

13. Гатауллин, И. Н. Восстановление ножей машин кормопроизводства методом пластического деформирования / И. Н. Гатауллин, Р. Р. Ахметзянов, **Р. С. Пополднев** // Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы: труды IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Волкова И.Е. – Казань: Казанский ГАУ, 2021. – С. 166-169.

14. **Пополднев, Р. С.** Анализ требований к энергии процесса измельчения кормов / Р. С. Пополднев // Научное сопровождение технологий агропромышленного комплекса: теория, практика, инновации: Научные труды III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., проф. Матяшина Ю.И. – Казань: Казанский ГАУ, 2023. – С. 372-378.

15. **Пополднев, Р. С.** Снижение энергетических затрат на измельчение путем совершенствования конструкции / Р. С. Пополднев, И. Х. Гайфуллин, Д. Т. Халиуллин, А. А. Замалетдинов // Современное состояние и перспективы развития технической базы АПК: Научные труды Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора П.Г. Мудрова. – Казань: Казанский ГАУ, 2023. – С. 87-93.

16. **Пополднев, Р. С.** Оптимизация процесса измельчения и смешивания кормов в измельчитель-смесителях для получения однородной кормовой массы / Р. С. Пополднев, Д. Т. Халиуллин, И. Х. Гайфуллин // Современное состояние и перспективы развития технической базы АПК: Научные труды всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Посвящается памяти д.т.н., профессора Мудрова А.Г. – Казань: Казанский ГАУ, 2024. – С. 441-447.

Формат 60×84 1/16

Тираж 100.

Печать офсетная. Усл. п.л. 1,0

Издательство КГАУ/420015 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65

Лицензия на издательскую деятельность код 221 ИД № 06342 от 28.11.2001 г.

Отпечатано в типографии КГАУ

420015 г. Казань, ул. К. Маркса, 65.

Казанский государственный аграрный университет

Подписано к печати

Заказ