

На правах рукописи

БРУСЕНКОВ Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ
С ВАЛЬЦОВЫМ ПОДПОРОМ**

Специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации
сельского хозяйства»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мичуринск-наукоград РФ, 2015

Работа выполнена на кафедре «Агроинженерия» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

Научный руководитель **Ведищев Сергей Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Курдюмов Владимир Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П. А. Столыпина», кафедра безопасности жизнедеятельности и энергетики, заведующий

Ульянов Вячеслав Михайлович,
доктор технических наук, профессор, почетный работник науки и техники РФ, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П. А. Костычева», кафедра механизации животноводства, заведующий

Ведущая организация ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства Россельхозакадемии (ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии), г. Подольск

Защита диссертации состоится «22» мая 2015 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета ДМ 220.041.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Мичуринский государственный аграрный университет» по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 5-32-13, E-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет» и на сайте www.mgau.ru, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные и скрепленные гербовой печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Михеев Н. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Продуктивность коров на 60...65% определяется их кормлением. На технологию приготовления и раздачи кормов приходится около 40% всех трудозатрат на ферме, а затраты на корма составляют около 50...60% себестоимости продукции. Низкое качество кормов не позволяет реализовать потенциальные возможности животных. Повышение эффективности производства продукции крупного рогатого скота (КРС) должно решаться за счет: сокращения ручного труда при обслуживании животных; создания благоприятных условий для реализаций их генетического потенциала; получения максимальной продуктивности с минимальными затратами кормов, материалов и энергии; использования современных бесстрессовых технологий и как следствие, повышения продуктивности животных на 15...20%.

Для повышения поедаемости и усвояемости кормов большое влияние оказывают способы их подготовки и переработки. Наибольший эффект дает приготовление полнорационных кормосмесей с предварительно приготовленными компонентами и добавками, включая измельченные корнеклубнеплоды. Применение корнеклубнеплодов позволяет решить введение в рационы животных необходимого количества сахара и крахмала, снизить кислотность в рубце и, как следствие, увеличить продуктивность и качество получаемой продукции КРС.

Анализ характеристик и конструкций измельчителей корнеклубнеплодов показывает, что выпускаемые промышленностью машины материалоемки, имеют низкие эксплуатационные показатели качества, высокую энергоемкость выполняемого процесса, не отвечают современным зоотехническим требованиям. В связи с этим совершенствование измельчителей корнеклубнеплодов и их рабочих органов, направленных на снижение удельного расхода энергии при сохранении качества технологического процесса измельчения корнеклубнеплодов, является актуальной задачей. Выполнение поставленной задачи имеет существенное значение для развития АПК, особенно отрасли животноводства.

Степень разработанности темы. Вопросами измельчения растительных материалов занимались многие ученые (В. Р. Алешкин, С. М. Ведищев, В. П. Горячкин, В. А. Желиговский, А. И. Завражнов, В. И. Курдюмов, С. В. Мельников, П. А. Ребиндер, Н. Е. Резник, М. В. Сабликов, Н. П. Тишанинов, В. М. Ульянов и многие другие). В ряде работ применительно к предложенным конструкциям определены рациональные, конструктивно-режимные параметры измельчителей, обеспечивающие снижение удельного расхода энергии. Полученные аналитические выражения для определения производительности и мощности не инвариантны относительно конструкций измельчителей и физико-механических свойств корнеклубнеплодов. Новый технологический процесс измельчения требует дополнительных исследований, направленных на снижение энергозатрат при обеспечении требований к качеству процесса.

Работа выполнена в рамках ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы на 2010–2011 годы» и Программы фунда-

ментальных и приоритетных прикладных исследований по научному обеспечению развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на 2011 – 2015 годы по проблеме 09: «Разработать высокоэффективные машинные технологии и технические средства нового поколения для производства конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции, энергетического обеспечения и технического сервиса сельского хозяйства» и отвечает требованиям паспорта специальности 05.20.01 по техническим наукам.

Научная гипотеза. Снижение скорости прохождения корнеклубнеплодов под действием вальцового подпора через ножевую решетку с регламентированным расположением плоских ножей позволяет снизить удельные затраты энергии на процесс резания при соответствии качества измельченных корнеклубнеплодов зоотехническим требованиям.

Цель и задачи. Снижение удельного расхода энергии на процесс резания корнеклубнеплодов в измельчающем устройстве с вальцовым подпором и плоскими ножами.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы задачи:

- исследовать теоретически рабочий процесс измельчающего устройства с вальцовым подпором и пластинчатыми ножами, определить влияние факторов на его конструктивно-режимные параметры;
- разработать лабораторные установки и провести исследования для уточнения коэффициентов трения и прочностных свойств корнеклубнеплодов;
- выполнить лабораторные исследования процесса резания и определить оптимальные конструктивно-режимные параметры измельчающего устройства с вальцами и установленными по окружности плоскими ножами;
- испытать опытный образец предложенного измельчающего устройства в производственных условиях, дать оценку технико-экономической эффективности использования.

Объект исследований. Технологический процесс резания корнеклубнеплодов в измельчающем устройстве с вальцовым подпором через ножевую решетку.

Предмет исследований. Закономерности взаимодействия корнеклубнеплодов с ножевой решеткой под действием вальцового подпора.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

- уточненная классификация измельчителей корнеклубнеплодов;
- теоретические закономерности технологического процесса измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором и плоскими ножами;
- математические модели взаимосвязи удельного расхода энергии с конструктивно-режимными параметрами измельчающего устройства;
- методика исследований коэффициентов трения и прочностных свойств корнеклубнеплодов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты теоретических исследований являются основой для совершенствования измельчи-

телей корнеклубнеплодов, расчета конструктивно-режимных параметров измельчающих устройств с вальцовым подпором и плоскими ножами.

Разработано устройство для измельчения корнеклубнеплодов (патент РФ № 2288571), обоснованы его конструктивно-режимные параметры.

Полученные результаты исследований и разработок рекомендуются для использования: при подготовке кормов к скармливанию животным в сельскохозяйственных предприятиях; проектными организациями, занимающимися разработкой измельчителей; в учебном процессе высших учебных заведений сельскохозяйственного профиля.

Методы исследования. Теоретические исследования проводились на основе методов математики, физики и классической механики, при определении взаимосвязи конструктивных и режимных параметров вальцово-ножевого устройства с физико-механическими свойствами корнеклубнеплодов. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях на основе общей и разработанной частной методик с использованием измерительной аппаратуры, прошедшей поверку, которые позволили обеспечить управляемость эксперимента и определить рациональные параметры процесса. Обработка результатов экспериментов выполнялась на ПЭВМ с использованием стандартных программ Microsoft Excel, Statistica 6.0, Versions 12.00 и разработанных автором.

Положения, выносимые на защиту:

- уточненная классификация измельчителей корнеклубнеплодов по новым классификационным признакам – форме рабочих органов и виду подпора;
- конструктивно-технологическая схема двухступенчатого измельчителя корнеклубнеплодов с вальцовым подпором и плоскими ножами, установленными по кольцу;
- теоретические зависимости определения конструктивно-режимных параметров измельчающего устройства с вальцовым подпором и плоскими ножами;
- методики, приборное обеспечение и результаты экспериментальных исследований прочностных свойств, усилий резания корнеклубнеплодов, коэффициентов трения покоя и движения корнеклубнеплодов по различным поверхностям;
- математическая модель определения производительности, удельного расхода энергии и показателей качества от конструктивно-режимных параметров измельчающего устройства.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений и выводов подтверждается результатами экспериментальных исследований, их достаточной сходимостью с теоретическими исследованиями, использованием современной контрольно-измерительной и вычислительной техники, приборов и оборудования, внедрением, числом опытов, совпадением полученных данных с ранее полученными на других объектах. Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на научных и

научно-практических конференциях: в ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов (2005, 2006 и 2008 годы); ФГБОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет» (2007 – 2009, 2014 годы); ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия» (2011 год); ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» (2011 год); ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», г. Тамбов (2011 и 2013 годы).

Экспериментальные исследования проводились в ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» и ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», г. Тамбов. Результаты исследований внедрены в колхозоплеменном заводе имени В. И. Ленина Тамбовского района Тамбовской области и учебном процессе ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Публикации по теме диссертации. Материалы диссертации отражены в 17 печатных работах, пять из которых входят в перечень ВАК РФ и двенадцать в РИНЦ. Общий объем публикаций составляет 7,1 печ. л., из которых 3,58 принадлежат лично автору.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературных источников из 170 наименований и 17 приложений и изложена на 195 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выполненной научной работы и сформулированы основные научные положения, которые выносятся на защиту.

В **первом разделе** «Состояние вопроса, цель и задачи исследований» приведен анализ и классификация машин для измельчения корнеклубнеплодов, позволившие определить, что за основу технологического процесса можно принять вертикальный двухступенчатый измельчающий аппарат с первой степенью дискового типа и второй степенью с вальцовым подпором и плоскими ножами, радиально установленными по кольцу.

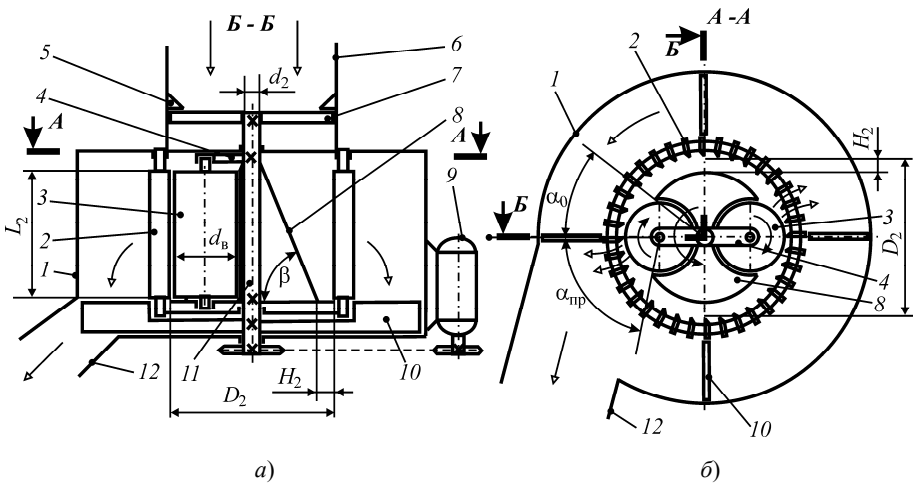
Анализ исследований ряда ученых (Л. Н. Ромазанов, В. И. Курдюмов, В.А. Богатов, Х. Х. Куйго, Я. А. Осипов, В. С. Горюшинский и др.) показал, что отсутствуют методики исследования производительности, потребляемой мощности от физико-механических свойств корнеклубнеплодов, конструктивных и режимных параметров двухступенчатого устройства для измельчения с плоскими ножами, установленными по кольцу и вальцовым подпором.

На основе анализа литературной и патентной информации в работе поставлена цель и сформулированы задачи исследований.

Во **втором разделе** «Теоретические исследования технологического процесса резания корнеклубнеплодов» описано устройство для измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором (патент РФ № 2288571).

Очищенные крупные корнеклубнеплоды из цилиндрической камеры 6 попадают под действие установленных на валу 11 (рисунок 1) горизонтальных плоских ножей 7 первой ступени резания и противорезов 5, закрепленных на внутренней стороне цилиндрической камеры 6.

Предварительно измельченные корнеклубнеплоды под действием силы тяжести попадают на наклонный конус 8 и прижимаются к ножевой решетке второй ступени измельчения, где захватываются вальцами 3 и продавливаются между ножей 2, расположенных на заданном расстоянии. Готовый продукт под действием крыльчатки 10 выгружается через горловину 12.



а) разрез Б-Б; б) разрез А-А

Рисунок 1 – Измельчающий аппарат

Производительность устройства для измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором и плоскими ножами рассчитывали по формуле

$$Q_{\text{изм2}} = \pi D_2 L_2 H_2 n_2 \rho_{2к} k_1 k_2 z_{в}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{изм2}}$ – производительность второй ступени измельчающего аппарата, кг/с; D_2 – диаметр камеры второй ступени измельчения, м; L_2 – длина ножей во второй ступени измельчения, м; H_2 – толщина слоя, захватываемая одним вальцом, м; n_2 – частота вращения рабочего органа второй ступени измельчения, с^{-1} ; $\rho_{2к}$ – насыпная плотность корма во второй ступени измельчения, кг/м^3 ;

z_B – количество валцов, шт.; k_1 – коэффициент использования длины лезвия ножа; k_2 – коэффициент, учитывающий пустоты между частицами продукта.

Необходимая длина ножей, определяющая высоту рабочей камеры:

$$L_2 \geq \frac{\left(D_2 - 2 \left(\frac{D_2}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_B}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_2 - d_B}{2} \right)^2} + d_B \left(\frac{D_2 - d_B}{2} \right) \cos \left(\frac{\varphi D_2}{D_2 - d_B} \right) \right) - d_2}{2 \operatorname{tg} \beta}, \quad (2)$$

где d_B – диаметр вальца, м; φ – угол трения, град; β – угол наклона образующей конуса к основанию, град.; d_2 – диаметр приводного вала, м.

Захват слоя корнеклубнеплодов в зону продавливания происходит под действием сил трения по поверхности вальца 3 и ножами 2. Эти силы определяют толщину слоя H_2 , влияющую на производительность второй ступени измельчения. Толщину слоя можно определить по выражению

$$H_2 = \frac{D_2}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_B}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_2 - d_B}{2} \right)^2} + d_B \left(\frac{D_2 - d_B}{2} \right) \cos \left(\frac{\varphi}{1 - \frac{d_B}{D_2}} \right). \quad (3)$$

Для обеспечения надежной работы устройства для измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором необходимо выполнить условие

$$h_{1z} \leq H_2, \quad (4)$$

где h_{1z} – толщина слоя корнеклубнеплодов, последовательно прорезаемая соседними ножами в первой ступени измельчения, м.

Для выполнения этого условия количество ножей в первой ступени определяли по выражению

$$z_1 = \frac{4Q_{\text{изм1}}}{\pi(D_1^2 - d_2^2) \rho_{\text{к1}} k_2 H_2 n_1}, \quad (5)$$

где D_1 – диаметр цилиндрической камеры, м; z_1 – количество ножей в первой ступени измельчения, шт.; n_1 – частота вращения рабочего органа в первой ступени измельчения, с^{-1} ; $\rho_{\text{к1}}$ – насыпная плотность корма в первой ступени измельчения, кг/м^3 .

В выражениях (2) и (3) определяющими для второй ступени измельчения являются диаметр камеры D_2 и угол трения φ . С точки зрения компактного

размещения вальцов и максимального использования захватывающей способности вальцов необходимо применять вальцы с максимально возможно бóльшим диаметром.

В связи с этим выражения (2) и (3) можно представить в следующем виде:

$$H_2 = \frac{D_2}{2} K_\phi; \quad (6)$$

$$L_2 \geq \frac{D_2(1 - K_\phi) - d_2}{2 \operatorname{tg} \beta}, \quad (7)$$

где K_ϕ – коэффициент конструктивных параметров, учитывающий влияние угла трения ϕ .

Зависимость изменения коэффициента K_ϕ при изменении угла трения ϕ в пределах от 20 до 50° имеет вид

$$K_\phi = 1 - \sqrt{0,5084 + 0,4916 \cos(1,77\phi)}. \quad (8)$$

В соответствии с зоотехническими требованиями для крупного рогатого скота размер измельченных корнеклубнеплодов должен находиться в пределах 10...15 мм. В соответствии с этим шаг h_2 расстановки ножей во второй ступени измельчения должен быть в пределах, обеспечивающих зоотехнические требования. При принятом количестве ножей z_2 расстояние h_2 между лезвиями ножей второй ступени измельчения находили по формуле

$$h_2 = D_2 \sin\left(\frac{\pi}{z_2}\right). \quad (9)$$

Максимальную частоту n_2 вращения рабочего органа второй ступени измельчения определяли из условия наиболее эффективного использования длины ножей L_2 и максимального заполнения ее камеры:

$$n_2 \leq \frac{h_2 z_2 \lambda}{\pi D_2 L_2 z_B} \sqrt{2g \left(2,1 \left(\frac{(d_B - a') \left(\sqrt{D_2^2 - d_B^2} - d_B - a' \right)}{2 \left(d_B + \sqrt{D_2^2 - d_B^2} - 4a' \right)} \right) - \frac{3,4\tau_0}{\rho_{k1}} \right)}, \quad (10)$$

где λ – коэффициент истечения; a' – размер корнеклубнеплодов после первой ступени измельчения, м; τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па.

Затраты мощности на измельчение во второй ступени определяли по выражению

$$N_2 = N_{\text{под2}} + N_{\text{р2}} + N_{\text{выг2}} + N_{\text{хх2}}, \quad (11)$$

где $N_{\text{под}2}$ – мощность, затрачиваемая на подвод корнеклубнеплодов в зону заземления, Вт; $N_{\text{р}2}$ – мощность, затрачиваемая на процесс резания, Вт; $N_{\text{выг}2}$ – мощность, затрачиваемая на выгрузку измельченных корнеклубнеплодов, Вт; $N_{\text{хх}2}$ – мощность холостого хода, Вт.

Наибольшие затраты мощности во второй ступени аппарата приходятся на резание и трение корнеклубнеплодов о валец и ножи:

$$N_{\text{р}2} = (N_{\text{рез}2} + N_{\text{тв}2})z_{\text{в}} + N_{\text{ир}2}, \quad (12)$$

где $N_{\text{рез}2}$ – мощность, затрачиваемая на резание, Вт; $N_{\text{тв}2}$ – мощность, затрачиваемая на трение корнеклубнеплодов о валец, Вт; $N_{\text{ир}2}$ – мощность, затрачиваемая на подвод корнеклубнеплодов к ножевой решетке, Вт.

Мощность $N_{\text{рез}2}$ находили по формуле

$$N_{\text{рез}2} = P_{\text{р}2} \mathfrak{Q}_{\text{р}2}, \quad (13)$$

где $P_{\text{р}2}$ – сила, действующая со стороны ножевой решетки на корнеклубнеплоды, Н; $\mathfrak{Q}_{\text{р}2}$ – скорость движения корнеклубнеплодов через ножевую решетку, м/с.

Силу $P_{\text{р}2}$ определяли по выражению

$$P_{\text{р}2} = (P_{\text{рез}2} + P_{\text{д}2} + P_{\text{тр}2})z_{\text{н}2}, \quad (14)$$

где $P_{\text{рез}2}$ – сопротивление резанию лезвием, Н; $P_{\text{д}2}$ – усилие на деформацию корнеклубнеплодов, Н; $P_{\text{тр}2}$ – усилие на преодоление трения, Н; $z_{\text{н}2}$ – количество ножей, одновременно участвующих в резании под действием одного вальца, шт.

Силу $P_{\text{рез}2}$ для одного ножа находили по формуле

$$P_{\text{рез}2} = k_{\text{м}} L_2 t_{\text{н}}^c \delta_1, \quad (15)$$

где $k_{\text{м}}$ – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала; $t_{\text{н}}$ – толщина лезвия ножа, м; c – показатель степени; δ_1 – отношение пути сжатия к длине элемента стружки.

Для определения усилий на деформацию корнеклубнеплодов в одном межножевом пространстве второй ступени измельчения использовали выражение

$$P_{\text{д}2} = \frac{E_3 L_2}{2h_2} (2t_{\text{н}2}^2 \sin(j_2 - \alpha_{\text{н}2})) \cos \alpha_{\text{н}2} - (2t_{\text{н}2} \cos \alpha_{\text{н}2} - S_{\text{н}} \sin \alpha_{\text{н}2})(S_{\text{н}} - t_{\text{н}2} \text{ctg } j_2) \sin \alpha_{\text{н}2}, \quad (16)$$

где E_3 – модуль упругопластических деформаций корнеклубнеплодов, Па; $t_{н2}$ – толщина ножа второй ступени измельчения, м; j_2 – угол заточки лезвия ножа, град; $\alpha_{н2}$ – угол между двумя соседними ножами, град; $S_{н}$ – ширина ножа, м.

Для определения усилий на преодоление трения в одном межножевом пространстве второй ступени измельчения использовали выражение

$$P_{тр2} = \frac{E_3 L_2 f}{h_2} \left(t_{н2}^2 \frac{\cos \alpha_{н2} \cos(j_2 - \alpha_{н2})}{\sin j_2} \right) + (t_{н2} \cos \alpha_{н2} - S_{н} \sin \alpha_{н2})(S_{н} - t_{н2} \operatorname{ctg} j_2) \cos \alpha_{н2}, \quad (17)$$

где f – коэффициент трения.

Среднюю скорость движения корнеклубнеплодов через ножевую решетку с учетом коэффициента K_{ϕ} определяли по выражению

$$v_{р2} = D_2 n_2 K_{\phi} \frac{180^\circ}{\alpha_0}, \quad (18)$$

где α_0 – центральный угол, определяемый по выражению

$$\alpha_0 = \arccos \left(\frac{0,141 + 0,359(1 - K_{\phi})^2}{1 - K_{\phi}} \right), \text{ град.}$$

Затраты мощности $N_{ир2}$ на подвод корнеклубнеплодов к ножевой решетке можно определить по выражению

$$N_{ир2} = \frac{D_2^3 L_2 \rho_{к1} K_{\phi} (1 - K_{\phi}) (2 - K_{\phi}) \omega_2^2}{32}, \quad (19)$$

где ω_2 – угловая скорость рабочего органа, с^{-1} .

Эффективность процесса измельчения оценивали показателем удельного расхода энергии:

$$N_{уд2} = \frac{N_2}{Q_{изм2}}, \quad (20)$$

где $N_{уд2}$ – удельный расход энергии, Вт·с/кг.

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена общая программа и методика экспериментальных исследований.

В программу экспериментальных исследований, реализованную в несколько этапов, входило: уточнить некоторые физико-механические и технологические свойства корнеклубнеплодов (плотность, влажность, размерно-

массовые характеристики, коэффициенты трения, прочностные свойства); изучить влияние конструктивных параметров одинарных и двойных ножей на усилие резания; исследовать зависимости производительности и энергозатрат от частоты вращения рабочего органа; оценить качество измельчения корнеклубнеплодов при различных режимах работы; обработать экспериментальные данные.

Исследования проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207–76, НТП АПК 1.10.11.001–00, РД 10.19.2–90, ОСТ 7.26–77. Обработка результатов исследований размерно-массовых характеристик корнеклубнеплодов осуществлялась разработанным приложением к программе Versions 12.00.

Для исследования усилий разрушения корнеклубнеплодов *10* была разработана установка, схема которой представлена на рисунке 2.

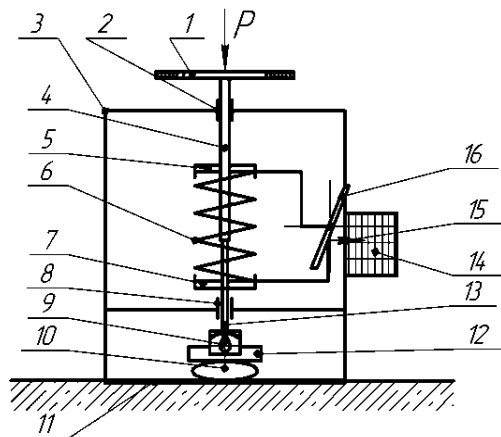


Рисунок 2 – Установка по исследованию усилий разрушения корнеклубнеплодов

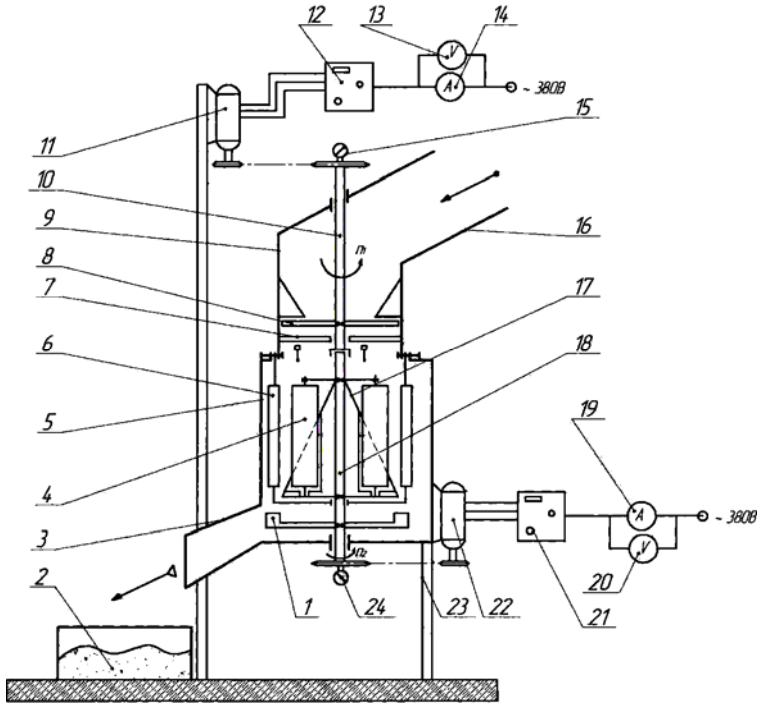
Для исследований усилий разрушения были изготовлены пуансон, одинарные и двойные ножи с углами заточки 25, 30 и 35°. Расстояние между двойными ножами составляло 6, 12 и 18 мм. Угол наклона ножей относительно стола *11* изменялся от 0 до 35° с интервалом 5°.

Исследования коэффициентов трения покоя и скольжения корнеклубнеплодов (картофель, морковь и свекла) проводились по поверхностям (сталь, сталь окрашенная, резина).

Показатели производительности, энергоемкости и качества процесса исследовались в диапазоне частот вращения рабочего органа от 2,35 до 7,89 с⁻¹ с интервалом 1,385 с⁻¹. Качество процесса оценивали по критерию однородности продукта.

Установка состоит из неподвижной рамки 3. В направляющих 2 и 8 рамки 3 установлен стержень, состоящий из двух частей: верхней 4 с рукояткой 1 и нижней 13, которые могут перемещаться друг относительно друга. Между верхней и нижней частями на чашках вставлена пружина 6. С верхней 5 и нижней 7 чашками связан передаточный механизм 16 указателя 15 пишущего устройства 14. К нижней части 13 стержня крепится винтом фиксации указатель 9 угла наклона сменного рабочего органа 12.

Исследования мощности, производительности и показателей качества процесса резания корнеклубнеплодов двухступенчатым измельчающим устройством проводились на установке, включающей установленные на раме 23 аппараты первичного и вторичного резания со своими приводами и контрольно-измерительной аппаратурой (рисунки 3 и 4).



1 – крыльчатка; 2 – емкость; 3 – выгрузная горловина; 4 – валец; 5 – корпус второй ступени измельчения; 6 – сменная ножевая решетка второй ступени измельчения; 7 – противорез; 8 – сменный нож первой ступени измельчения; 9 – корпус первой ступени измельчения; 10 – вал первой ступени измельчения; 11, 22 – моторы-редукторы; 12, 21 – частотные преобразователи; 13, 20 – вольтметры; 14, 19 – амперметры; 15, 24 – тахометры; 16 – загрузочная горловина; 17 – конус; 18 – вал второй ступени измельчения; 23 – рама
 Рисунок 3 – Схема лабораторной установки измельчителя корнеклубнеплодов с вальцовым подпором



а)

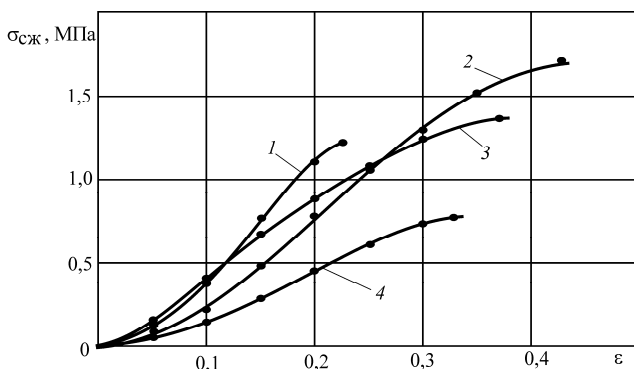


б)

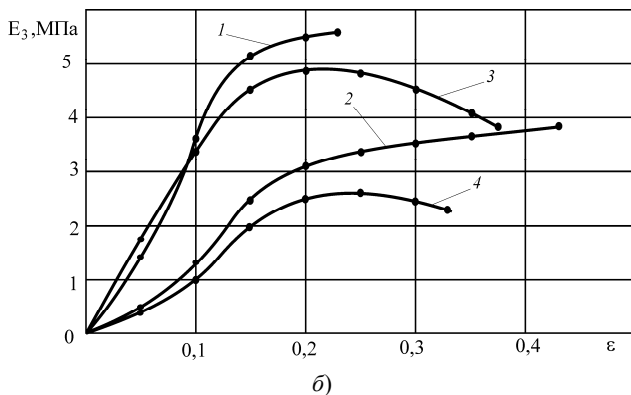
а) общий вид; б) первичный и вторичный аппараты резания
Рисунок 4 – Лабораторная установка двухступенчатого измельчителя корнеклубнеплодов

В четвертом разделе «Результаты и анализ экспериментальных исследований» представлены результаты исследований по составу задач, сформулированных выше.

Результаты исследований на прочность по напряжениям сжатия $\sigma_{сж}$ и модулю упругопластических деформаций E_3 в зависимости от значения относительной деформации ϵ представлены на рисунке 5. Зависимость напряжения $\sigma_{сж}$ и модуля упругопластических деформаций E_3 от относительной деформации ϵ для корнеклубнеплодов имеет S-образную форму. Вначале напряжение растет медленнее, а при достижении значения относительной деформации, $\epsilon = 0,1$, происходит более интенсивный рост до момента разрушения исследуемого образца, после чего величина напряжения резко снижается, и в образце образуется трещина (или несколько трещин), направленных под углом к прилагаемой нагрузке.



а)



1 – свекла (сорт «Авангард»); 2 – морковь поперек волокон (сорт «Рогнеза»);
3 – морковь вдоль волокон; 4 – картофель (сорт «Лорх»)

Рисунок 5 – Зависимости напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ (а)

и модуля упругопластических деформаций E_3 (б) от относительной деформации ϵ

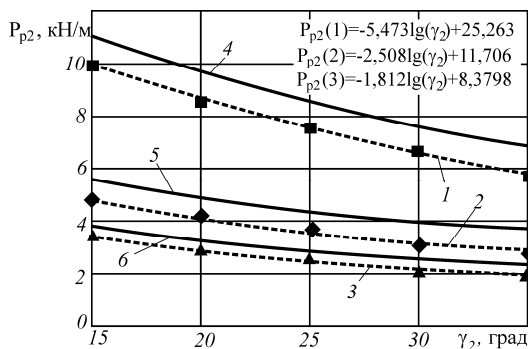
Модуль упругопластических деформаций E_3 при росте относительной деформации ϵ вначале плавно возрастает. При значении относительной деформации более 0,12...0,15 рост модуля E_3 для некоторых корнеклубнеплодов замедляется (морковь вдоль волокон, свекла) или начинает снижаться (морковь поперек волокон, картофель) до значения, при котором происходит разрушение исследуемого образца. Такой характер зависимостей изменения прочностных свойств корнеклубнеплодов связан с тем, что корнеклубнеплоды являются биологическими объектами, имеющими неравномерную внутреннюю структуру. Поэтому увеличение нагрузки вначале приводит к сжатию, уплотнению структуры и удалению микропор. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к более равномерному распределению напряжений внутри исследуемого образца и линейному изменению прочностных свойств корнеклубнеплодов. При достижении предельных значений прочности корнеклубнеплода сначала происходит разрыв связей между отдельными волокнами и клетками, прочностные свойства образца начинают снижаться, но разрушения не происходит. Это определяет снижение (морковь поперек волокон, картофель) или замедление (свекла, морковь вдоль волокон) модуля E_3 при увеличении напряжения $\sigma_{сж}$. Численные значения указанных показателей различных корнеклубнеплодов существенно отличаются.

По результатам экспериментов выявлены зависимости усилий резания от угла заточки ножа γ_2 и угла наклона лезвия τ ножа к противорежущей пластине. При увеличении угла γ_2 снижается удельная сила воздействия ножа, которая имеет нелинейный характер. Более интенсивное снижение наблюдается при $\gamma_2 > 30^\circ$. Это связано с уменьшением усилия на деформацию корнеклубнеплодов. Макси-

мальное значение удельная сила воздействия ножа имеет при угле наклона лезвия относительно противорежущей пластины (стола) $\tau=0$. При увеличении угла τ удельная сила воздействия ножа q_m снижается. Более интенсивное снижение удельной силы воздействия ножа наблюдается при угле наклона $\tau > 25^\circ$. Это связано с кинематической трансформацией угла заточки лезвия.

Зависимость усилий резания корнеклубнеплодов двойными ножами с сопротивлением резанию P_{p2} , расстоянием между ножами h_2 , углом заточки ножей γ_2 представлена на рисунке 6. Расчетные зависимости были установлены по выражению (14) при количестве ножей $z_{h2} = 2$ шт. и угле между ножами $\alpha_{h2} = 0^\circ$.

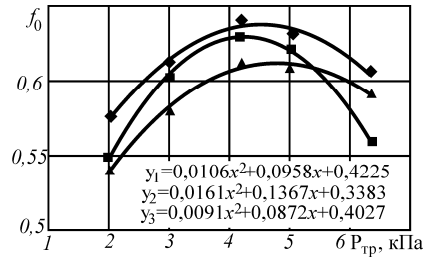
При увеличении расстояния h_2 от 6 до 12 мм сопротивление интенсивно снижается почти в 2 раза, а при увеличении h_2 от 12 до 18 мм – сопротивление резанию снижается менее чем на 20%, т.е. влияние h_2 на сопротивление резанию уменьшается. Это связано с тем, что при проталкивании между ножами корнеклубнеплоды интенсивно сжимаются и при величине относительной деформации $\varepsilon = 0,29$ картофель начинает разрушаться под действием усилий резания и напряжений деформации. При расстоянии $h_2 > 15$ мм будут нарушаться зоотехнические требования к измельчению корнеклубнеплодов. Поэтому при проектировании измельчающих аппаратов с ножевой решеткой величину h_2 необходимо выбирать в пределах от 12 до 15 мм. При увеличении угла γ_2 от 25 до 35° удельное сопротивление резанию двойными ножами снижается, что связано с кинематической трансформацией лезвия ножа (острота заточки лезвия).



1, 2, 3 – экспериментальные зависимости;
4, 5, 6 – расчетные зависимости;
1, 4 – угол заточки ножей $\gamma_2 = 25^\circ$;
2, 5 – угол заточки ножей $\gamma_2 = 30^\circ$;
3, 6 – угол заточки ножей $\gamma_2 = 35^\circ$
Рисунок 6 – Зависимость сопротивления P_{p2} резанию двойными ножами от расстояния между ножами h_2

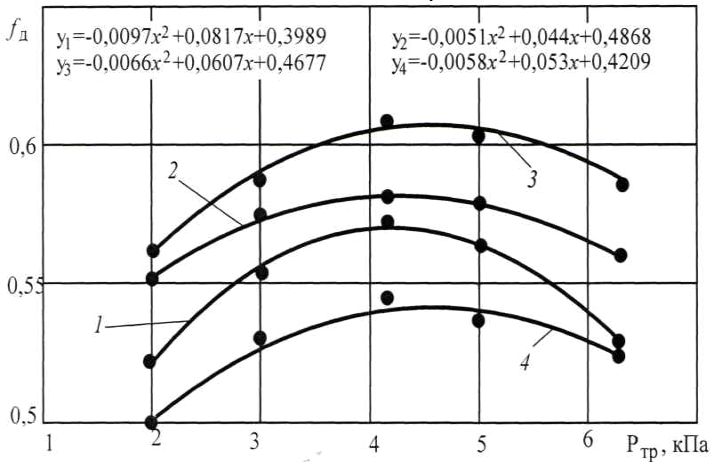
Зависимости изменения коэффициента трения покоя картофеля, моркови и свеклы о стальную поверхность от величины давления в зоне контакта и скорости движения представлены на рисунках 7 и 8.

При увеличении давления в зоне контакта от 2,0 до 4,2 кПа коэффициент трения возрастает и достигает своего максимального значения. Рост коэффициента трения при увеличении давления от 2,0 до 4,2 кПа связан с тем, что при повышении давления корнеклубнеплоды более плотно взаимодействуют с поверхностью, увеличивая силы сцепления. Дальнейшее увеличение давления приводит к выделению сока, который образует жидкостную пленку, действующую как смазка и уменьшающую силы взаимодействия.



1 – морковь; 2 – картофель; 3 – свекла
 Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения покоя от значения давления по стальной окрашенной поверхности

При увеличении давления в зоне контакта от 4,2 до 6,4 кПа коэффициент трения скольжения снижается. Это объясняется тем, что при скоростях движения поверхностей 2,0...2,6 м/с выделяющийся сок успевает выдавиться в небольшом количестве из зоны контакта, частично снижая эффект действия сока как жидкой смазки. При скоростях движения от 2,600...3,095 м/с выделяющийся сок не успевает полностью выдавиться из зоны контакта и работает как жидкая смазка.

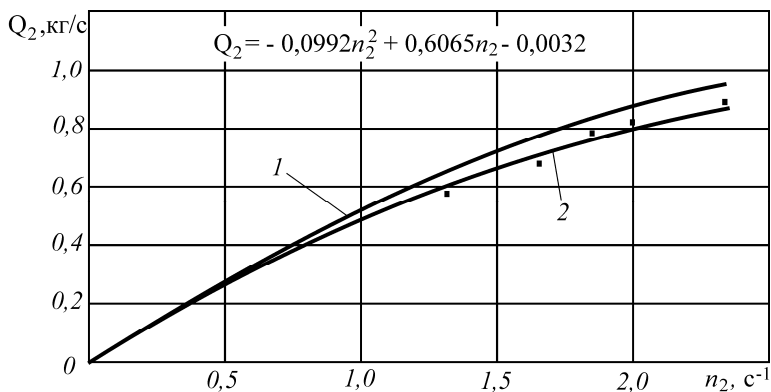


1 – скорость $\vartheta_{тр} = 0,258$ м/с; 2 – скорость $\vartheta_{тр} = 2,064$ м/с;
 3 – скорость $\vartheta_{тр} = 2,58$ м/с; 4 – скорость $\vartheta_{тр} = 3,095$ м/с

Рисунок 8 – Зависимость коэффициента трения скольжения картофеля от нагрузки при скорости движения по стальной окрашенной поверхности

Коэффициент трения корнеклубнеплодов о стальную окрашенную и об-резиненную поверхности имеет меньшие значения, чем о стальную из-за меньшей шероховатости.

Зависимости производительности $Q_{изм2}$ измельчающего устройства с вальцовым подпором от частоты вращения n_2 представлены на рисунке 9.

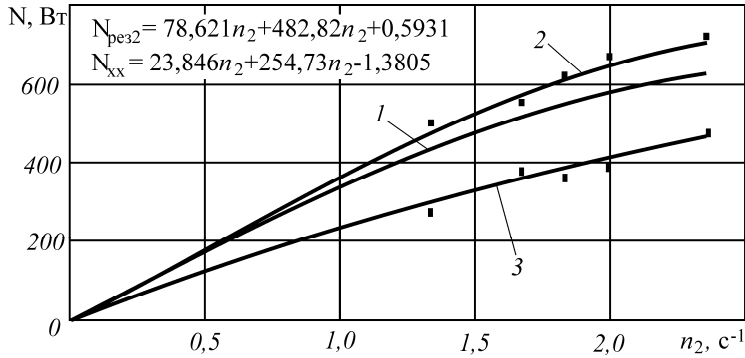


1 – теоретическая зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

Рисунок 9 – Зависимость производительности Q_2 измельчающего устройства с вальцовым подпором от частоты вращения n_2 рабочего органа

Теоретическая зависимость изменения производительности построена по выражению (1) с учетом коэффициента заполнения K_3 и располагается над экспериментальной. Это связано с условиями заполнения камеры измельчения. Величина коэффициента заполнения K_3 изменяется в зависимости от частоты вращения n_2 и находится в пределах $K_3 = 0,561 \pm 0,045$. Больше значение коэффициента K_3 соответствует частоте $n_2 = 2,35 c^{-1}$, а меньшее значение коэффициента – частоте вращения $n_2 = 1,33 c^{-1}$ или меньше. Это связано с тем, что корнеклубнеплоды не успевают опуститься вниз и полностью заполнить объем камеры второй ступени измельчения.

Зависимости изменения мощности от частоты вращения n_2 представлены на рисунке 10. При увеличении частоты вращения затраты мощности на процесс резания возрастают, причем теоретические затраты мощности имеют значения меньшие, чем полученные в результате экспериментов. Это связано с тем, что при построении теоретической зависимости не учитывались затраты мощности на инерционный подпор $N_{ип2}$. Коэффициент, учитывающий инерционный подпор при изменении частоты вращения от 1,33 до 2,35 c^{-1} , составляет $K_{и2} = 1,09...1,13$. Больше значение коэффициента $K_{и2}$ соответствует большому значению частоты вращения.



1 – теоретическая зависимость измельчения; 2 – экспериментальная зависимость измельчения;
 3 – экспериментальная зависимость инерционного подпора и холостого хода
 Рисунок 10 – Зависимость затрат мощности N на процесс измельчения во второй ступени от частоты вращения n_2 рабочего органа

Зависимость изменения удельного расхода энергии $N_{уд}$ от частоты вращения n_2 представлена на рисунке 11. При увеличении n_2 до $1,83 \text{ c}^{-1}$ величина $N_{уд}$ снижается; при дальнейшем увеличении n_2 от $1,83$ до $2,35 \text{ c}^{-1}$ $N_{уд}$ возрастает.

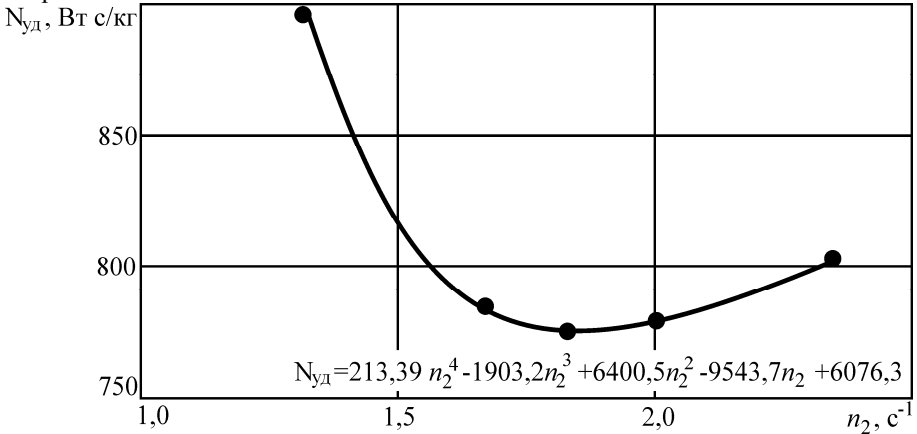


Рисунок 11 – Зависимость удельного расхода $N_{уд}$ энергии второй ступени измельчения от частоты вращения n_2 рабочего органа

Снижение $N_{уд}$ с ростом производительности обеспечивается за счет увеличения коэффициента заполнения камеры. При n_2 более $1,83 \text{ с}^{-1}$ камера не успевает полностью заполниться, что приводит к снижению производительности измельчающего устройства и повышению удельного расхода энергии. Минимальное значение удельного расхода энергии при частоте $n_2 = 1,83...2,0 \text{ с}^{-1}$ составляет $N_{уд} = 774,4...779,0 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{кг}$.

При изменении n_2 от $1,33$ до $2,35 \text{ с}^{-1}$ значение коэффициента однородности $K_{од}$ находилось в пределах от $95,2$ до $96,1\%$.

С учетом критерия удельного расхода энергии $N_{уд}$ рациональное значение частоты вращения составляет $n_2 = 1,67...2,00 \text{ с}^{-1}$. Удельный расход энергии находится в пределах $N_{уд} = 774,4...779,0 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{кг}$.

В **пятом разделе** «Производственная проверка устройства для измельчения корнеклубнеплодов. Техничко-экономическая оценка эффективности его внедрения» представлена практическая реализация результатов исследования и их технико-экономическая оценка.

Производственная проверка двухступенчатого измельчающего устройства с вальцовым подпором и кольцевой ножевой решеткой проводилась и была принята к внедрению на МТФ в колхозе-племенном заводе имени Ленина Тамбовского района Тамбовской области.

Производственная проверка подтвердила работоспособность и показатели производительности, мощности и качества измельчаемого продукта.

Оценка экономической эффективности предлагаемого устройства для измельчения в сравнении с ИКМ-Ф-10 показала, что за счет снижения скоростных характеристик в измельчающем устройстве потребляемая мощность уменьшается на $46,2\%$, удельный расход энергии составил $1068,7 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{кг}$ в базовом и $N_{уд} = 774,4...779,0 \text{ Вт}\cdot\text{с}/\text{кг}$ – в проектных вариантах, срок окупаемости предлагаемого устройства для измельчения корнеклубнеплодов составляет $1,76$ года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Уточненная классификация измельчителей корнеклубнеплодов и анализ научных исследований позволили разработать новую конструкцию измельчающего устройства корнеклубнеплодов с вальцовым подпором, позволяющего получать ломтики заданной толщины (патент РФ № 2288571) и удовлетворяющего зоотехническим требованиям.

2. Теоретические исследования позволили получить аналитические выражения:

- производительности устройства для измельчения корнеклубнеплодов (1);

– длины ножей (7) и толщины слоя, захватываемого одним вальцом (6) от диаметра рабочей камеры и конструктивного коэффициента, определяемого по выражению (8);

– частоты вращения рабочего органа второй ступени устройства для измельчения корнеклубнеплодов (10);

– сил (14), действующих на корнеклубнеплод со стороны ножевой решетки с учетом физико-механических свойств измельчаемых материалов (коэффициенты трения, модуль упругопластических деформаций) и условий резания (угол заточки, толщина, ширина и шаг расстановки ножей, скорость резания) (18);

– затрат мощности на второй ступени измельчения (11) и процесс активного резания (12), удельного расхода энергии (20) в зависимости от конструктивных и режимных параметров измельчающего устройства и некоторых физико-механических свойств измельчаемых корнеклубнеплодов.

3. Результаты экспериментальных исследований свойств корнеклубнеплодов позволили установить:

– зависимости напряжения сжатия $\sigma_{сж}$ от относительной деформации ϵ от нуля до 0,25...0,35 (момент разрушения) имеют вытянутую S-образную форму;

– при увеличении относительной деформации ϵ от нуля до 0,12...0,15 наблюдается линейный рост модуля упругопластических деформаций E_3 ;

– при изменении ϵ от 0,12...0,15 до 0,25...0,35 модуль упругопластических деформаций увеличивается на 10...20% (свекла, морковь вдоль волокон) или после кратковременного роста на 9...10% (картофель, морковь поперек волокон) резко снижается с последующим разрушением целостности образца;

– коэффициент трения скольжения по стальной окрашенной, неокрашенной и обрешеченной поверхностям имеет максимальное значение $f = 0,55...0,68$ при давлении в зоне контакта 4,0...4,1 кПа и скорости до $\vartheta_{тп} = 2,58$ м/с, при увеличении давления от 4,1 до 6,4 кПа и росте скорости выше 2,58 м/с значение f уменьшается в 1,03–1,19 раз за счет выделения сока.

4. Экспериментальные исследования конструктивно-режимных параметров позволили установить, что:

– угол заточки лезвия ножа должен находиться в пределах 25...35°, а шаг расстановки ножей в аппарате вторичного резания – $h_2 = 12...15$ мм;

– рациональная частота вращения рабочего органа находится в пределах от 1,67 до 2,10 с⁻¹;

– при рациональной частоте вращения рабочего органа удельный расход энергии на процесс измельчения находится в пределах 774,9...779,0 Вт·с/кг; коэффициент однородности – $K_{од} = 95,2...96,1$ %.

5. Производственная проверка измельчающего устройства в колхозе-племзаводе имени Ленина Тамбовского района Тамбовской области

подтвердила эффективность предложенного решения при измельчении картофеля для откормочного поголовья крупного рогатого скота, при этом производительность составляла 0,8 кг/с, установленная мощность – 4,85 кВт.

По сравнению с ИКМ-Ф-10 удельная энергоёмкость снижается в 1,35 раза и составляет $N_{уд} = 774,4...779,0$ Вт·с/кг, срок окупаемости – 1,76 года.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Ведищев, С. М.** Совершенствование измельчающего аппарата для клубнемойки ИКМ-5М / С. М. Ведищев, А. В. Брусенков, А. В. Прохоров // Сельский механизатор. – 2006. – № 6. – С. 25.

2. **Брусенков, А. В.** Экспериментальное исследование усилий резания лезвием корнеклубнеплодов / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – № 2(33). – С. 64 – 67.

3. **Ведищев, С. М.** Исследование процесса трения корнеклубнеплодов о различные поверхности / С. М. Ведищев, А. В. Брусенков, А. В. Прохоров // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – № 2(33). – С. 68 – 71.

4. **Ведищев, С. М.** Исследование прочностных свойств корнеклубнеплодов / С. М. Ведищев, А. В. Брусенков, А. В. Прохоров // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – № 1(50). – С. 99 – 102.

В патентах на изобретения

5. **Пат. 2288571** Российская Федерация МПК⁷ А01А 29/00 (2006.01). Измельчитель сочных кормов / Ведищев С. М., Брусенков А. В., Прохоров А. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2005116425/12; заявл. 30.05.2005 ; опубл. 10.12.2006; Бюл. № 34. – 5 с.

В других изданиях

6. **Ведищев, С. М.** Измельчитель кормов / С. М. Ведищев, А. В. Брусенков, А. В. Прохоров // Качество науки – качество жизни : сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. 25–26 февраля 2005 года. – Тамбов : ПБОЮЛ Бирюкова М. А., 2005. – С. 202–203.

7. **Брусенков, А. В.** Обоснование параметров измельчителя сочных кормов / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев // Составляющие научно-технического прогресса : сб. материалов науч.-практ. конф. – Тамбов : Першина, 2005. – С. 168 – 171.

8. **Брусенков, А. В.** Кормоприготовительный агрегат / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров // X научная конференция ТГТУ : пленарные докл. и краткие тез. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – С. 168 – 171.

9. **Брусенков, А. В.** Измельчитель сочных кормов / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, Г. О. Котов, М. Ю. Бурдилов // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : сб. тр. XI науч. конф. ТГТУ. В 2 ч. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2006. – Ч. 2. – С. 29 – 31.

10. **Брусенков, А. В.** Обоснование конструктивно – технологической схемы измельчителя корнеклубнеплодов / А. В. Брусенков // Повышение эффективности ис-

пользования сельскохозяйственной техники : сб. науч. тр. ГНУ ВИИТиН. – Тамбов : ГНУ ВНИИТиН, 2007. – Вып. 13. – С. 90 – 94.

11. **Ведищев, С. М.** Измельчитель сочных кормов / С. М. Ведищев, А. В. Брусенков // Современные проблемы технологии производства, хранения, переработки и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции : Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Мичуринск : Изд-во ФГОУ ВПО «Мичуринский государственный аграрный университет», 2007. – С. 225 – 228.

12. **Брусенков, А. В.** Определение производительности и конструктивных параметров элементов второй ступени измельчителя / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров, А. А. Капацына // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : сб. тр. XIII науч. конф. ТГТУ / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2008. – С. 259 – 262.

13. **Брусенков, А. В.** Методика определения физико-механических свойств корнеклубнеплодов / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров, А. А. Капацына // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 9 – 12.

14. **Брусенков, А. В.** Обоснование конструктивных параметров измельчающего аппарата / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев // Перспективные технологии и технические средства в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Мичуринск : Изд-во ФГОУ ВПО МичГАУ, 2008. – С. 79 – 82.

15. **Брусенков, А. В.** Исследование конструктивных параметров второй ступени измельчителя корнеклубнеплодов / А. В. Брусенков // Образование наука: инновационный аспект : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. / Пензенская ГСХА. – Пенза : РИО ПГСХА, 2011. – Т. 2. – С. 177 – 179.

16. **Брусенков, А. В.** Обзор машин для измельчения корнеклубнеплодов / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения Кобы В. Г. – Саратов : Изд-во КУБиК, 2011. – С. 13 – 17.

В учебно-методической литературе

17. **Ведищев, С. М.** Изучение измельчителей корнеклубнеплодов : лабораторные работы / С. М. Ведищев, А. В. Прохоров, А. В. Брусенков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 31 с.

Подписано в печать 20.01.2015.
Формат 60 × 84/16. 1,0 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ 19
Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08, 63-81-33. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru