

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу
Пополднева Родиона Сергеевича на тему «Разработка конструкции и
обоснование параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса**

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность животноводства в значительной степени определяется качеством кормовой базы и рациональным использованием энергетических ресурсов при подготовке кормов к скармливанию. Корнеклубнеплоды являются незаменимым компонентом рационов крупного рогатого скота, однако их подготовка остается одной из наиболее трудоемких и энергозатратных операций. Существующие парки измельчителей, представленные на рынке, ориентированы преимущественно на крупные сельскохозяйственные предприятия и характеризуются высокой металлоемкостью, значительным энергопотреблением и недостаточным качеством готового продукта с точки зрения зоотехнических требований.

Особую остроту проблема приобретает для малых фермерских хозяйств, где требуется компактное, энергоэффективное и универсальное оборудование, способное не только измельчать, но и смешивать компоненты кормосмеси. В этой связи диссертационная работа Р.С. Пополднева, направленная на разработку конструкции и обоснование параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, обеспечивающего заданное качество продукта при снижении энергозатрат и сохранении питательной ценности, является актуальной и практически значимой для агропромышленного комплекса.

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Диссертационная работа имеет классическую структуру, включающую введение, пять глав, заключение, список литературы и девять приложений. Объем работы составляет 174 страницы, включая 46 рисунков и 18 таблиц. Библиографический список содержит 142 наименования.

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

В первой главе выполнен обстоятельный анализ современного состояния вопроса. Автором подробно рассмотрено значение корнеклубнеплодов в кормлении животных, классифицированы способы их обработки, проведен обзор существующих конструкций измельчителей (ИГК-30Б, ИСК-3А, ИРМ-50, МУИК-10, К-300 и др.) и патентных решений. Выявлены основные недостатки существующего оборудования: высокая энергоемкость, недостаточное качество измельчения, отсутствие функции смешивания. Проанализированы теоретические исследования процесса измельчения, выполненные В.П. Горячкиным, Н.Е. Резником,

С.В. Мельниковым, В.И. Курдюмовым и другими учеными. На основе анализа сформулированы направления собственных исследований.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям. Соискателем разработана конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя (рисунок 2.1 диссертации, рисунок 1 автореферата). Получены аналитические выражения для определения пропускной способности (2.2), степени измельчения (2.5) и энергоемкости процесса (2.29). Разработана математическая модель процесса резания, учитывающая работу на каждом ряду ножей (2.6-2.22). Особого внимания заслуживает теоретическое обоснование формы лопасти швырялки выгрузной камеры (раздел 2.5). Соискателем составлены дифференциальные уравнения движения материала по лопасти (2.30-2.47), проведено их численное решение в среде Microsoft Visual Studio на языке С# и получены графические зависимости, позволяющие определить рациональный радиус кривизны и направление изгиба лопасти.

Третья глава содержит программу и методику экспериментальных исследований. Подробно описаны лабораторные установки, приборы и оборудование (измерительный комплект К-50, частотный преобразователь, тензометрическая установка, ситовой классификатор, тахометр МЕТЕОН, весы лабораторные и др.). Разработаны частные методики определения физико-механических свойств картофеля (влажность, трение, работа резания), удельной энергоемкости, степени измельчения, однородности и потерь сока. Представлена методика планирования многофакторного эксперимента.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований. Автором установлены физико-механические свойства картофеля (влажность 74,21-80,69%, геометрические размеры). Выявлена прямая зависимость удельной работы резания от толщины ножа: увеличение толщины с 1 до 5 мм приводит к росту энергозатрат более чем в 22 раза (рисунок 4.1 диссертации, рисунок 7 автореферата). Экспериментально определены коэффициенты трения скольжения (0,86-1,11), качения и опрокидывания. Получены графические зависимости удельной энергоемкости и производительности от частоты вращения ротора при различных комбинациях рабочих органов (рисунок 4.2-4.5 диссертации, рисунок 8 автореферата). Установлено, что увеличение частоты вращения выше 1200 мин⁻¹ приводит к экспоненциальному росту энергоемкости и снижению производительности. Исследовано влияние конструктивных параметров на фракционный состав продукта (рисунок 4.6-4.9) и потери сока (рисунок 4.14). Определено, что лучшие показатели по содержанию целевой фракции (5-20 мм) достигаются при частоте вращения 1200 мин⁻¹ с использованием 8 рядов ножей и лопасти швырялки, загнутой против направления вращения (88,87%). Установлено, что при частотах вращения 1000-1200 мин⁻¹ потери сока находятся в допустимых пределах (1,9-2,7%).

Пятая глава посвящена оценке эффективности разработанного устройства. Производственные испытания в КФХ ИП Иمامеевой Ф.М. подтвердили работоспособность и эффективность измельчителя-смесителя: производительность 0,42-0,58 т/ч, степень измельчения 4,5, однородность продукта до 90%, потери сока не более 2,1%. Выполнена сравнительная энергетическая и технико-экономическая оценка с серийным измельчителем корнеплодов К-300. Годовой экономический эффект составляет 199563 рубля при сроке окупаемости 0,16 лет.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, соответствующие поставленным задачам.

Приложения содержат программу численного расчета, показания измерительных приборов, результаты фракционного анализа, акты внедрения и производственных испытаний, патенты.

СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблеме измельчения корнеклубнеплодов посвящены труды многих отечественных и зарубежных ученых. Значительный вклад в развитие теории резания и измельчения кормов внесли В. П. Горячкин, В. А. Желиговский, Н. Е. Резник, С. В. Мельников, а также современные исследователи – В. И. Курдюмов, П. А. Савиных и др. В работах этих авторов заложены основы расчета энергоемкости процесса, определены зависимости качества измельчения от конструктивных параметров рабочих органов, исследованы физико-механические свойства кормового сырья. Анализ существующих конструкций измельчителей (ИГК-30Б, ИСК-3А, ИРМ-50, МУИК-10, К-300 и др.) показывает, что большинство серийно выпускаемых машин ориентировано на крупные животноводческие комплексы, характеризуется высокой металлоемкостью и энергопотреблением. При этом вопросы создания компактных, энергоэффективных измельчителей-смесителей для малых фермерских хозяйств, обеспечивающих одновременно измельчение и смешивание компонентов, исследованы недостаточно полно. Отсутствуют научно обоснованные рекомендации по выбору рациональных параметров многорядных ножевых аппаратов с вертикальным расположением ротора, а также по оптимизации геометрии выгрузных устройств.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЯ

В диссертационной работе получен ряд новых научных результатов, имеющих значение для развития теории и практики измельчения кормового сырья.

Во-первых, автором предложена оригинальная конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя с конической рабочей камерой и многорядным расположением ножей на вертикальном валу с уменьшающимся шагом. Принципиальным отличием является возможность регулирования интенсивности процесса посредством изменения угла установки поворотных направляющих пластин в диапазоне от 0 до 90°, что позволяет адаптировать режимы работы под различные виды сырья. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ на изобретения №2760435, № 2788535 и полезную модель № 230912.

Во-вторых, разработана математическая модель процесса измельчения, учитывающая работу резания на каждом ряду ножей, явление скользящего резания и суммарную мощность привода. Модель позволяет прогнозировать энергозатраты в зависимости от числа ножей, частоты вращения ротора и физико-механических свойств материала, что создает основу для инженерных расчетов подобных устройств.

В-третьих, впервые получены графоаналитические зависимости, позволяющие определить рациональные геометрические и режимные параметры лопасти швырялки выгрузной камеры. Соискателем составлены и численно

решены дифференциальные уравнения движения материала по лопасти, учитывающие центробежные и кориолисовы силы инерции, силы трения и геометрию лопасти. Установлено, что для обеспечения минимального времени пребывания материала в выгрузной камере лопасть должна быть загнута против направления вращения с радиусом кривизны $R = 0,15$ м.

В-четвертых, экспериментально получены уравнения удельной энергоемкости, пропускной способности и процентного содержания частиц целевой фракции (5-20 мм) в зависимости от частоты вращения ротора при различных комбинациях рабочих органов. Установлены рациональные режимы работы: частота вращения 1200 мин^{-1} , использование 8 рядов ножей и лопасти швырялки, загнутой против направления вращения, что обеспечивает содержание целевой фракции до 88,87% при потерях сока 1,9-2,3%.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных представлений о процессе измельчения корнеклубнеплодов в аппаратах с многорядным расположением ножей на вертикальном валу. Разработанные аналитические зависимости и математические модели позволяют прогнозировать энергозатраты и качество измельчения на стадии проектирования, что сокращает объем экспериментальных исследований при создании нового оборудования. Предложенный подход к моделированию движения материала по криволинейной лопасти может быть использован при расчете выгрузных устройств различных центробежных аппаратов.

Практическая значимость работы подтверждается созданием лабораторно-производственной установки измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (Э-ИСК-05), прошедшей успешные производственные испытания в КФХ ИП Иمامеевой Ф.М. (Рыбно-Слободский район Республики Татарстан). Разработанные рекомендации позволяют:

- повысить производительность труда на 10-15% при подготовке кормосмесей;
- снизить энергоемкость процесса на 5-10%;
- обеспечить содержание целевой фракции корма (5-20 мм) до 88-90%;
- сократить потери сока до 2,1-2,3%, что способствует сохранению питательной ценности корма.

Расчетный годовой экономический эффект от применения разработанного измельчителя-смесителя в сравнении с серийным измельчителем К-300 составляет 199563 рубля при сроке окупаемости капитальных вложений 0,16 лет. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия».

ДОСТОВЕРНОСТЬ И ОБОСНОВАННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечивается:

- корректным применением фундаментальных законов механики, теории резания и тепломассообмена;

- использованием современных методов математического моделирования и численных расчетов;
- применением стандартизированных методик экспериментальных исследований (ГОСТ ISO 6498-2014, ГОСТ 7194-81, ГОСТ Р 54783-2011);
- использованием аттестованного измерительного оборудования (измерительный комплект К-50, тахометр МЕГЕОН, влагомер Эвлас 2м и др.);
- достаточным объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой;
- хорошей сходимостью теоретических и экспериментальных результатов (расхождение не превышает 15%);
- положительными результатами производственных испытаний, подтвержденных актами внедрения.

Основные положения диссертации опубликованы в 16 научных работах, включая 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 1 статья в издании, индексируемом в Scopus, и 3 патента РФ. Результаты исследований неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-практических конференциях.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

При общей положительной оценке диссертационной работы необходимо отметить следующие замечания:

1. В первой главе при анализе существующих конструкций измельчителей следовало бы более подробно рассмотреть современные зарубежные аналоги, предназначенные для малых фермерских хозяйств (например, оборудование фирм Krone, Strautmann, Trioliet), и провести их сравнительный анализ с отечественными разработками.

2. В методике экспериментальных исследований (раздел 3.3.3) при определении удельной работы резания использовалась установка с динамометром, однако не указано, каким образом обеспечивалась постоянная скорость резания и учитывалось ли влияние инерционных сил на результаты измерений при динамическом характере процесса.

3. В методике экспериментальных исследований (раздел 3.4) автор приводит таблицу 3.2 с 48 факторами, влияющими на процесс работы измельчителя-смесителя. Однако в дальнейших экспериментах варьировались только три фактора: частота вращения ротора, количество ножей и направление лопасти швырялки. Выбор именно этих факторов в качестве управляемых в целом обоснован, однако следовало бы пояснить, каким образом учитывалось влияние остальных 45 факторов и почему они были отнесены к категории стабилизируемых или неконтролируемых.

4. При определении потерь сока (раздел 4.6) эксперименты проводились только для одной комбинации рабочих органов (8 рядов ножей и лопасть против направления вращения). Для получения более полной картины целесообразно было бы исследовать влияние на потери сока также количества ножей и направления лопасти швырялки, поскольку эти факторы могут существенно влиять на сохранность питательных веществ.

5. В таблице 4.6 приведены данные по удельной энергоёмкости для различных комбинаций рабочих органов. Наблюдается значительный разброс

значений (например, при 800 мин⁻¹ от 1679,4 до 2225,91 Вт·с/кг, при 1400 мин⁻¹ от 6500 до 7778,88 Вт·с/кг). Требуется пояснить физические причины такого разброса и его связь с конструктивными особенностями исследуемых комбинаций.

6. В пятой главе приведены результаты производственных испытаний, подтверждающие эффективность разработанной машины. Однако из текста не ясно, учитывалась ли при интерпретации результатов вариабельность свойств исходного сырья (размеры клубней, их влажность) в разные дни испытаний, а также какова была продолжительность непрерывной работы оборудования и не наблюдалось ли залипания рабочих органов при переработке влажного материала.

7. В работе не в полной мере исследован вопрос о влиянии влажности исходного сырья на показатели процесса измельчения. Эксперименты проводились при естественной влажности картофеля 74-80%, однако в производственных условиях влажность может существенно варьироваться, что, вероятно, будет влиять на энергоемкость и качество продукта.

8. В актах внедрения (Приложения Е, Ж) указана производительность 0,42-0,58 т/ч, однако в теоретической части (глава 2) приводится расчетный диапазон 0,3-1,4 т/ч. Следовало бы пояснить, чем обусловлен выбор более узкого рабочего диапазона в производственных условиях и какие факторы ограничивают производительность при эксплуатации.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать:

- в производственной деятельности – при оснащении кормоприготовительных цехов животноводческих ферм и комплексов, особенно в условиях малых фермерских хозяйств. Разработанный измельчитель-смеситель Э-ИСК-05 может найти применение для подготовки корнеклубнеплодов к скармливанию крупному рогатому скоту;
- в проектных и конструкторских организациях – при разработке новых и модернизации существующих конструкций измельчителей кормового сырья. Предложенные математические зависимости и методики расчета могут быть использованы для обоснования параметров подобного оборудования;
- в учебном процессе – при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Агроинженерия» в курсах «Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства и животноводства», «Техника и технологии для животноводства», а также при выполнении курсовых и дипломных проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Пополднева Родиона Сергеевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научно-технической задачи – повышение эффективности процесса измельчения корнеклубнеплодов путем создания и обоснования параметров энергосберегающего измельчителя-смесителя, обеспечивающего требуемое

зоотехническими нормами качество корма при снижении энергозатрат и сохранении питательной ценности.

По актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости полученных результатов, достоверности и обоснованности выводов диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в текущей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Считаю, что автор диссертационной работы, Пополднев Родион Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

Официальный оппонент: кандидат технических наук (Специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»), доцент, доцент кафедры «Агроинженерия» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

**Брусников
Алексей
Владимирович**

« 16 » марта 2026 г.

Подпись Брусникова А.В. заверяю
Ученый секретарь Ученого совета
ФГБОУ ВО «ТГТУ», к.т.н., доцент



Г.В. Мозгова

« 16 » марта 2026 г.

Адрес: 392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Тел.: +7 (4752) 63-10-19

E-mail: aleksei_brusnikov@mail.ru

Вход. № 05-8864
« 31 » 03 2026 г.
подпись