

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный аграрный университет»

На правах рукописи



Пополднев Родион Сергеевич

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

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного  
комплекса

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Зиганшин Б.Г.

Казань – 2026 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....</b>	<b>13</b>
1.1 Значение корнеклубнеплодов в кормлении сельскохозяйственных животных.....	13
1.2 Классификация способов обработки корнеклубнеплодов .....	16
1.3 Химический состав корнеклубнеплодов и их питательность .	18
1.4 Технические средства для измельчения корнеклубнеплодов ....	20
1.5 Анализ теоретических исследований процесса измельчения корнеклубнеплодов .....	32
<b>Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ .....</b>	<b>38</b>
2.1 Конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов .....	38
2.2 Определение пропускной способности измельчителя- смесителя и степени измельчения корнеклубнеплодов .....	42
2.3 Определение энергоемкости измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.....	44
2.4 Алгоритм и программа численного расчета параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов .....	51
2.5 Обоснование формы лопасти штырялки выгрузной камеры измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов .....	51
2.5.1 Лопасти, загнутые по направлению вращения (вогнутые).....	52
2.5.2 Лопасти, загнутые против направления вращения (выпуклые)	56
<b>Глава 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>63</b>
3.1 Общая программа экспериментальных исследований.....	63
3.2 Измерительные приборы и оборудование.....	64
3.3 Методика определения основных физико-механических характеристик .....	68

3.3.1 Методика определения влажности клубней.....	70
3.3.2 Методика по определению коэффициента трения клубней картофеля .....	72
3.3.3 Методика исследования параметров резания клубней картофеля .....	75
3.4 Методика исследования влияния режимов работы измельчителя-смесителя на показатели технологической эффективности процесса .....	77
3.5 Методика определения удельного расхода энергии .....	89
3.6 Методика определения степени измельчения и неоднородности измельченного корма .....	91
3.7 Методика определения потери сока.....	95
<b>Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....</b>	<b>98</b>
4.1 Физико-механические свойства картофеля.....	98
4.2 Результаты определения удельной работы резания клубней картофеля .....	99
4.3 Результаты экспериментального определения коэффициента трения.....	102
4.4 Результаты по определению удельного расхода энергии.....	104
4.5 Результаты влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя на степень измельчения и однородность измельченного корма .....	108
4.6 Результаты влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя на потери сока.....	117
<b>Глава 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ .....</b>	<b>120</b>
5.1 Оценка показателей эффективности измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов в производственных условиях.....	120
5.2 Энергетическая оценка и сравнение разработанного устройства с серийным измельчителем корнеплодов К-300.....	121

5.3 Технико-экономическая оценка эффективности измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов .....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	129
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Программа расчета пропускной способности измельчителя-смесителя и энергоемкости процесса измельчения резанием .....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Показания приборов измерительного комплекта .....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты влияния частоты вращения ротора на фракционный состав измельченной массы для каждой комбинации рабочих органов .....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Акт об использовании (внедрении) научно-исследовательской работы в учебном процессе .....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акт об использовании (внедрении) измельчителя-смесителя в учебном процессе кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе».....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Акт производственных испытаний измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов .....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт внедрения результатов НИОКР в КФХ ИП Имаеева Ф. М. ....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ З. Справка о демонстрации на выставках результатов НИР .....	168
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Патенты .....	169

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Животноводство – важная отрасль сельского хозяйства. Для повышения производительности труда в животноводстве требуется комплексная механизация, автоматизация и тщательный контроль качества всех производственных процессов. Получение кормов, соответствующих требованиям государственных стандартов ГОСТ ISO 6498-2014, ГОСТ Р 54951-2012, ГОСТ Р 52812-2007 и др. из сельскохозяйственных продуктов представляет собой ключевую задачу, направленную на повышение рентабельности и конкурентоспособности производства животноводческой продукции. Это связано с тем, что качественные корма не только способствуют улучшению здоровья и продуктивности животных, но и обеспечивают стабильность в производственных процессах. В условиях растущей конкуренции на рынке животноводства, соблюдение стандартов качества кормов становится важным фактором, влияющим на экономическую эффективность и устойчивое развитие отрасли. Основная роль животноводства в обеспечении продовольственной безопасности страны заключается в его способности выступать стабильным источником обеспечения населения жизненно важными продуктами питания высокой биологической ценности, что детерминирует его стратегический приоритет в агропромышленном комплексе, а его мультипликативный эффект на смежные отрасли и создание занятости в сельской местности оказывает существенное влияние на устойчивое социально-экономическое развитие аграрных территорий, укрепляя тем самым их экономический потенциал и способствуя сбалансированному региональному развитию [1].

Животноводство в России сохраняет высокие показатели, а Республика Татарстан занимает второе место в стране по производству животноводческой продукции. Татарстан поставляет свинину, говядину, баранину, мясо птицы, молоко и яйца. Наиболее стабильны поставки говядины и молока, так как животноводство зависит от разведения крупного рогатого скота. Поголовье

крупного рогатого скота достигает в среднем 369,1 тыс. голов. Убойный вес превышает 85 тыс. т. На долю молочного производства приходится почти 6 % от общего объема производства молока в стране, что в цифрах составляет в среднем 1751,8 тыс. т в год. Татарстан – экономически важный субъект РФ. Огромное место среди других отраслей занимает аграрный сектор [2].

Животноводство охватывает множество комплексных направлений, включая специализированные отрасли, технологически связанные между собой добычей и переработкой сырья, и производством готовой продукции. Важнейшими условиями успешного развития животноводства являются: создание прочной кормовой базы, переработка кормов, совершенствование средств механизации и автоматизация производственных процессов. Продуктивность скота в значительной степени зависит от качества кормов. Особое место в кормлении скота занимают высокоэнергетические корма с концентрированными питательными веществами. Это позволяет точно регулировать кормовой баланс и значительно повышать продуктивность скота. Некоторые технологии и технологические процессы получения кормов имеют проблемы с его заготовкой, так как наиболее ресурсоемкой частью переработки кормов является измельчение. На долю процесса измельчения при приготовлении кормов приходится до 60 % энергозатрат и, в свою очередь, 50 % всех экономических затрат на приготовление кормов [3-7].

При повышении эффективности животноводства необходимо уделять внимание на качество кормов. Одним из основных факторов, определяющих себестоимость животноводческой продукции, являются затраты на производство кормов. В комплексном механизированном процессе работы животноводческих ферм большую роль играет приготовление кормов, включая измельчение корнеклубнеплодов, являющийся – одним из энергоемких и трудоемких процессов в цепочке приготовления кормов. Измельчение осуществляется в зависимости от вида и возрастной группы животных с целью получения более мелких частиц, рекомендованных для данного корма. При разработке измельчителей кормов учитываются

следующие основные требования: обеспечение высокого качества измельчения, соответствующего зоотехническим стандартам; удобство использования и эксплуатации; компактность и безопасность в работе; долговечность и низкая металлоемкость; возможность автоматизации рабочего процесса [8-12]. Эти требования могут быть удовлетворены путем модификации существующих или разработки новых измельчителей. Согласно установленным зоотехническим требованиям, корма должны иметь однородную массу и быть по возможности без мелких частиц (размер частиц <5 мм). Скармливание животных мелкими частицами корма замедляет процесс набора мышечной массы и негативно сказывается на пищеварительной системе, поскольку корм проглатывается без должного пережевывания. Скармливание корнеклубнеплодов повышает активность микробиологических процессов в пищеварительном тракте. Корнеклубнеплоды нейтрализуют кислотность кормов, повышают содержание молока и жира, способствуют откорму животных [13-16].

**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 д.р., внесшие значительный вклад в изучение взаимосвязи физических характеристик корма и эффективности кормления сельскохозяйственных животных. [17-30]. Однако, не достаточно полно исследовались вопросы измельчения клубней картофеля и создания малогабаритных и энергоэффективных измельчителей-смесителей для фермерских хозяйств.

**Целью работы является** 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 штырялки выгрузной камеры, обеспечивающей 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 научные положения и выводы, сформулированные по результатам диссертационного исследования, обсуждались и получили положительную оценку на научно-исследовательских и практических конференциях различного уровня, в том числе: на Всероссийской научно-практической конференции (Москва, 16 декабря 2020 г.); на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции (Нальчик, 04–05 февраля 2021 г.); на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора, академика академии Аграрного образования, лауреата Государственной премии РФ в области науки и техники, заслуженного изобретателя СССР Гайнанова Хазипа Сабировича (Казань, 26 февраля 2021 г.); на Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Мудрова П.Г. (Казань, 28 – 29 октября 2021 г.); на IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Волкова И.Е. (Казань, 04 июня 2021 г.); на III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Матяшина Ю.И. (Казань, 28 февраля 2023 г.); на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора П.Г. Мудрова (Казань, 26 – 27 октября 2023 г.); на Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвящённой памяти д.т.н., профессора Мудрова Александра Григорьевича (Казань, 29 – 30 октября 2024 г.).

**Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.** Соискателем выполнены все исследования, изложенные в диссертации: анализ состояния вопроса по теме работы, на основе которых

выявлено одно из перспективных направлений совершенствования технологий и машин для измельчения и смешивания кормов в условиях фермерских хозяйств, на которые получены три патента Российской Федерации (№ 2760435, № 2788535, № 230912); теоретически обоснованы конструктивно-технологические параметры нового измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов; разработаны методики, по которым проведены экспериментальные исследования нового измельчителя-смесителя, выполнен их анализ; дана технико-экономическая оценка разработанной машины; обоснованы выводы и предложены рекомендации по результатам исследований. Участие других лиц в проведении некоторой части исследований полностью 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 «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.

## Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1 Значение корнеклубнеплодов в кормлении сельскохозяйственных животных

Одним из основных направлений государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия является развитие животноводства. Для успешного развития молочного скотоводства требуется рациональное кормление, которое полностью удовлетворяет потребности животных во всех необходимых питательных веществах. Недостаток энергии и легкоусвояемых углеводов (сахар, крахмал) в рационах для молочных коров и КРС на откорме приводит к расходованию протеина и аминокислот на энергетические потребности, что значительно увеличивает потребность животных в них. Такое нерациональное питание приводит к нарушению энергетического и углеводно-жирового обмена, снижает продуктивность и репродуктивные функции животных. Современное животноводство характеризуется полной реализацией генетического потенциала. Из-за нарушений технических правил содержания, кормления и доения скота реализуется лишь 40 – 60 % потенциала продуктивности имеющегося поголовья. Без решения проблемы полноценного питания животных невозможно увеличить производство животноводческой продукции [1, 2].

Для кормления крупного рогатого скота используются корма и промышленные продукты животного и растительного происхождения. Рацион крупного рогатого скота базируется преимущественно на кормах, имеющих растительное происхождение, включая грубые, сочные и концентрированные виды. Создание устойчивой кормовой базы и обеспечение поголовья высококачественными, экономически эффективными сочными и грубыми кормами представляют собой фундаментальное условие для развития продуктивного животноводства. Однако, согласно аналитическим данным [1],

фактический уровень обеспеченности кормовыми ресурсами не превышает 75% от расчетной потребности. При этом качество заготавливаемых кормов зачастую не отвечает зоотехническим требованиям, что обуславливает необходимость восполнения дефицита питательных веществ за счет включения в рацион дорогостоящих концентрированных кормовых добавок в ходе откорма животных. Указанная технологическая мера провоцирует рост себестоимости кормопроизводства свыше 30%. Ежегодный недополученный объем молока в стране оценивается в 4–5 млн тонн). Существующие нормативы заготовки грубых и сочных кормов на одно животное составляют лишь 21–22 кг, что на 20–25% ниже научно обоснованных зоотехнических норм. Как свидетельствует практика ряда сельскохозяйственных предприятий, интенсификация производства говядины и оптимизация издержек могут быть реализованы посредством широкого использования локальных, малозатратных кормовых ресурсов [3-8].

Картофель занимает одно из первых мест в мировом производстве растениеводства, вместе с рисом, пшеницей и кукурузой. Картофель имеет широкий спектр использования. Благодаря высокому содержанию крахмала, высококачественного белка и витаминов в клубнях, он является важным продуктом в питании. Картофель также является хорошим кормом для скота. Он содержит органическое вещество, которое легко переваривается, и занимает первое место среди растительных кормов. Для скота используют сырье и пареные клубни, а также засыпанную ботву. Значительным кормовым потенциалом обладают побочные продукты переработки картофеля, в частности, мезга и барда, использование которых в рационах сельскохозяйственных животных способствует оптимизации кормовой базы. Картофелеводство играет значительную роль в агротехнической и экономической системах сельского хозяйства, выступая в качестве ценного предшественника в севообороте [9-16, 31-35].

Корнелубнеплоды характеризуются высоким содержанием воды, которое достигает 75 – 92 %, углеводов, где основную долю сухого вещества

составляют крахмал и сахара, и небольшое количество протеина и клетчатки. Их включение в рацион сельскохозяйственных животных, особенно в зимний период, демонстрирует ряд зоотехнических преимуществ. Наиболее значимым из них является способность существенно повышать коэффициенты переваримости и усвоемости питательных веществ комбинированных кормов. Данный эффект имеет особую ценность в условиях рационов, сбалансированных по содержанию сухих белковых соединений и зольных элементов, что наглядно иллюстрируется данными, представленными в таблице 1.1 [36-41].

Таблица 1.1 – Содержание питательных веществ в корнеклубнеплодах

Корнеклубнеплод	Содержание в 1 кг питательных веществ в г				
	Протеин	Сахар	Кальций	Фосфор	Натрий
Кормовая свёкла	7-9	50-55	0,2 - 0,4	0,2-0,4	0,4-0,6
Сахарная свёкла	12-15	175-180	0,3 -0,5	0,3-0,5	0,4-0,6
Картофель	10-16	6-8	0,1- 0,2	0,7-0,9	0,1- 0,2
Морковь	6-10	48-50	0,3-0,6	0,1-0,3	0,3-0,5

Органические соединения, содержащиеся в корнеклубнеплодных культурах, поддаются полному перевариванию в кишечнике рогатого скота в диапазоне от 85 % до 95 %. Поскольку зимой отсутствует доступ к свежей зеленой траве, а наличие достаточного количества углеводов и витаминов в рационе является крайне важным для птиц, скота и диких животных, корнеклубнеплоды служат им незаменимым пищевым источником [38, 39].

Анализ современного состояния кормовой инфраструктуры показывает, что обеспечение подсобных хозяйств кормами, особенно протеином, является недостаточным. По данным Всероссийского научно-исследовательского института кормов, ежегодно не обеспечивается около 1,1 млн. т кормового белка в сочных кормах [42-46].

Производство корнеклубнеплодов с использованием современных технологических линий является энерго- и трудоемким процессом. Чтобы производство корнеклубнеплодов стало более ресурсосберегающим и не требующим больших затрат ручного труда, необходимо разработать новые методы и инновационные технические средства для их мойки, очистки и измельчения.

## 1.2 Классификация способов обработки корнеклубнеплодов

Дополнительная механическая обработка, измельчение и смешивание компонентов кормосмеси в процессе раздачи способны повысить коэффициент их переваримости в среднем в 1,5 раза. Методы технологической обработки кормов (рисунок 1.1) выбираются в зависимости от вида, физического состояния и качественных показателей кормовых ресурсов, с обязательным учетом производственного направления (типа), породных особенностей и возрастной категории обслуживаемого поголовья.



Рисунок 1.1 – Способы обработки кормов

Механическая обработка кормовых материалов расширяет возможность и упрощает их использование в рационах различных видов животных, что способствует развитию кормовой базы отрасли. Такая обработка позволяет добавлять в рационы свиней стеблевые, крупно кусковые и другие виды кормов.

Тепловая обработка кормов увеличивает и улучшает поедание животными. Например, неподготовленная солома слабо поедается животными (не более 2-3 кг на одно животное большой рогатой скот), и при этом значительная часть корма приходится тратить впустую – 20-30%.

Биологическая обработка кормов повышает переваримость. Зерновые корма, обладающие высоким содержанием питательных веществ и хорошими вкусовыми качествами, часто оказываются малоэффективными при отсутствии предварительной обработки.

Химическая обработка кормов снижает энергозатраты на пережевывание и предотвращает некоторые заболевания животных. Например, для пережевывания 1 кг соломы животному требуется 625 – 840 Дж. Таким образом, экономия энергии на пережевывание эквивалентна увеличению продуктивности корма.

Электрическая обработка кормов расширяет ассортимент доступных видов кормов, создает условия для промышленного производства и приготовления кормов, а также внедрения передовых технологий в кормление животных. Подходящая обработка кормовых сырьевых материалов позволяет приготовлять комбинированные кормовые смеси и полноценные рационы.

Корнеклубнеплоды находят применение в рационах сельскохозяйственных животных и птицы в различных технологических формах: в сыром виде, в составе влажных кормосмесей или комбинированных кормов, в виде сущеной стружки, а также после термической обработки (пропаривания) и в комбинации с другими кормовыми ингредиентами. Согласно установленным зоотехническим нормативам [27-29], при использовании корнеклубнеплодов в сыром виде обязательным требованием

является их механическая очистка, обеспечивающая уровень загрязнения посторонними примесями не более 2 %. Для оптимизации потребления крупным рогатым скотом рекомендована предварительная подготовка сырья, включающая измельчение до фракции размером 10 – 15 мм.

### **1.3 Химический состав корнеклубнеплодов и их питательность**

Продуктивность сельскохозяйственных животных и формирование высококачественной продукции детерминированы наличием в организме порядка ста разнообразных химических элементов и их соединений. Среди спектра биологически активных соединений, оказывающих существенное влияние на рост, развитие и продуктивные функции животных, ключевое значение принадлежит витаминам, ферментам, гормонам и азотистым добавкам.

Рационы сельскохозяйственных животных содержат корма природного и искусственного происхождения, при этом важна биодоступность питательных веществ и отсутствие токсичности. Корма классифицируются по происхождению, составу и ценности. Питательность корма определяется его способностью удовлетворять потребности животных, что оценивается анализом химического состава, энергетической ценности, переваримости и усвоемости.

Оценка питательности основана на анализе шести основных компонентов: влага, сырая зола, сырой протеин, сырой жир, сырая клетчатка и БЭВ. Сырой протеин включает белки и небелковые азотистые соединения. Белки необходимы для построения и функционирования организма, а их биологическая ценность определяется аминокислотным составом, особенно содержанием незаменимых аминокислот. Недостаток незаменимых аминокислот критичен для животных, таких как свиньи и птица, из-за ограниченного содержания этих веществ в зерновых культурах [53-56].

Углеводы являются важным источником энергии для животных. Они

быстро всасываются и легко распадаются, образуя в итоге воду и углекислый газ. В рационе также присутствуют безазотистые экстрактивные вещества, клетчатка и другие соединения. Жир представляет собой еще один источник энергии в кормах. Сырая клетчатка, состоящая из целлюлозы и других компонентов, содержится в различных кормах в разных количествах.

Общая питательность корма зависит от его способности откладываться в виде продукции в результате метаболизма углеводов, жиров и частично белков. Нормы кормления являются основой для определения оптимального количества питательных веществ, необходимых для поддержания жизнедеятельности животного и получения высококачественной продукции. Рационы, составленные в соответствии с нормами кормления, должны соответствовать биологическим особенностям и потребностям животных. Они также должны быть разнообразными и включать доступные и дешевые корма.

Тип кормления определяется структурой рациона и соотношением между группами кормов. Рацион может быть силосным или содержать другие преобладающие корма. Выбор типа кормления осуществляется в зависимости от требований и особенностей каждого вида животных. В стойловый период для крупного рогатого скота наиболее типичным выступает корнеплодно-концентратный тип кормления. В его рамках объемы вводимых в рацион силоса, корнеклубнеплодов и концентрированных кормов варьируются в соответствии с видом и заданным уровнем продуктивности поголовья.

Зарубежные исследования подтверждают эффективность использования сбалансированных многокомпонентных кормосмесей в молочном животноводстве. Применение данной технологии позволяет повысить продуктивность на 15 – 20 %, сократить затраты на лечение метаболических заболеваний на 50 % и оптимизировать расход кормов на 10 – 15 % за счет улучшения усвояемости [57-59]. Механизированное приготовление и раздача кормосмесей эффективны при различных системах содержания и откорма скота. Полнорационные смеси обеспечивают стабильное поступление питательных веществ, витаминов и минералов, положительно влияя на

здоровье и продуктивность. В результате, эта технология способствует повышению рентабельности молочного производства. Анализ современного состояния кормовой инфраструктуры показывает, что обеспечение подсобных хозяйств кормами, особенно протеином, является недостаточным. По данным Всероссийского научно-исследовательского института кормов, ежегодно не обеспечивается около 1,1 млн. т кормового белка в сочных кормах. Удельный расход кормов на 1 кг привеса КРС составляет почти 14 корм. ед., а на 1 кг молока расходуется 1,2 – 1,3 корм. ед., что в 1,5 – 2 раза больше, чем в передовых странах.

#### **1.4 Технические средства для измельчения корнеклубнеплодов**

До настоящего времени проблема получения высококачественного продукта остается актуальной при подготовке кормов перед скармливанием скоту. В этом отношении более благоприятными представляются расщепление, истирание и резание. Исходя из этих соображений, анализ литературы и теоретическое исследование рабочего процесса измельчителей показали, что основными факторами, определяющими рабочий процесс, являются влажность измельчаемого корма, частота вращения ротора, площадь, занимаемая режущими ножами за один оборот, угол наклона, количество несоответствий, а также количество и форма ножей. Для измельчения корма применяют следующие способы: плющение, дробление ударом, раскалывание, разрыв, расщепление, истирание, резание.

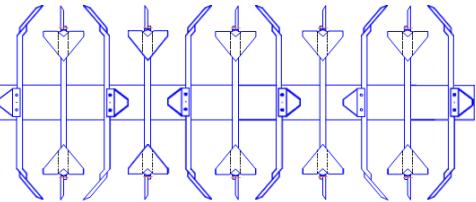
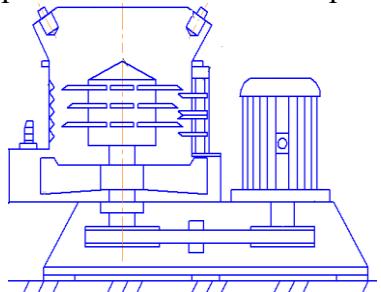
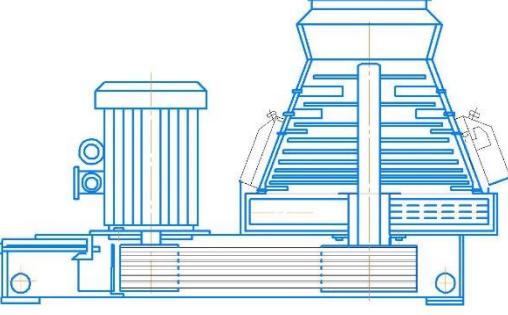
Для механического воздействия на измельчаемый корм используют рабочие органы, которые представлены в таблице 1.2 [60-68].

Измельчение корнеклубнеплодов является ключевым технологическим приемом повышения эффективности их использования в животноводстве, интенсифицируя процессы переваривания и повышая усвояемость питательных веществ за счет увеличения площади активной поверхности частиц корма.

Таблица 1.2 – Классификация рабочих органов измельчителей

Тип рабочего органа	Ученые	Способ механического воздействия на измельчаемый материал
Штифтовой	Мельников С.В., Резник Н.Е., Ревенко И.И.	Излом, разрыв и перетирание
С ножами, закрепленными на крыльчатке	Мельников С.В., Резник Н.Е., Брагинец Н.В., Ялпачик Г.С., Ревенко И.И.	Резание, расщепление
С продольно-поперечным резанием	Элли А.Я., Рустамов С.И., Горячкин В.П.	Резание, расщепление
С многоплоскостным рабочим органом	Аюгин П.Н., Резник Н.Е., Рустамов С.И.	Расщепление

## Продолжение таблицы 1.2

<b>Фрезбарабан</b> 	Мельников С.В., Резник Н.Е., Белянчиков Н.Н., Алешкин В.Р.	Резание используя Г-образные ножи
<b>Вертикальный ножевой барабан</b> 	Мельников С.В., Резник Н.Е., Ревенко И.И., Вольвак С.Ф.	Резание применяя противорезы
<b>Вертикальный ножевой барабан с конусной камерой измельчения</b> 	Зиганшин Б.Г., Пополднев Р.С., Халиуллин Д.Т.	Многоступенчатое резание с противорезами

Оптимальная степень измельчения кормового сырья определяется совокупностью требований: необходимостью достижения максимальной биологической доступности, уровнем механизации процессов, а также условиями минимизации потерь массы и питательных веществ.

Этап измельчения встраивается в общую технологическую цепь, исходя из принципа минимизации совокупных питательных и энергетических потерь. Корнеклубнеплоды подвергаются измельчению непосредственно перед введением в кормосмесь. Для их обработки требуется использование специализированных рабочих органов оборудования, параметры которых подбираются с учетом вида сырья, его физико-механических свойств и требуемой дисперсности измельчения [42].

Соответствие зоотехническим требованиям при кормлении животных корнеклубнеплодами подразумевает, что перед скармливанием эти плоды

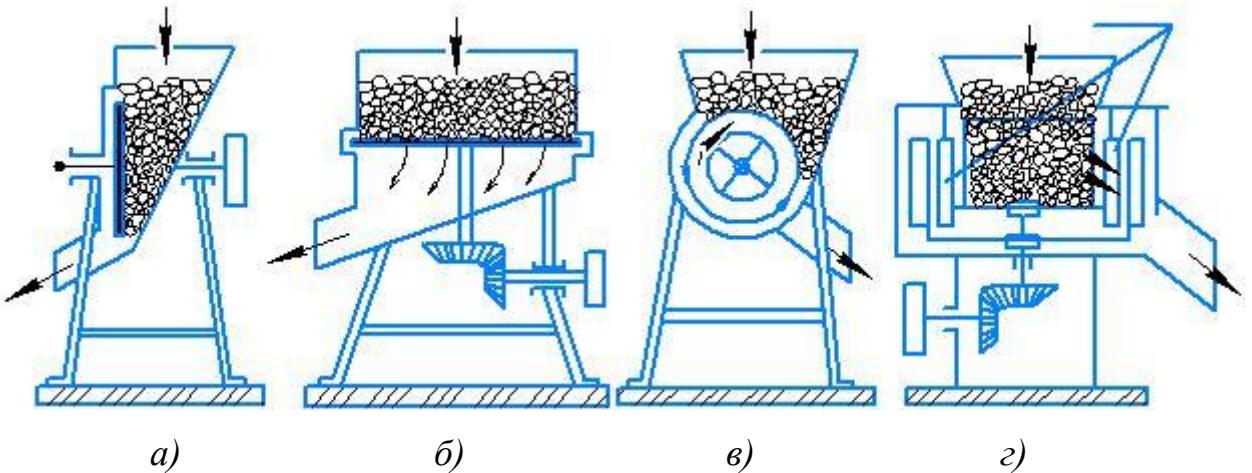
должны быть очищены от посторонних включений до такой степени, чтобы загрязнённость не превышала установленных норм и составляла не более 2 %. Для рациона крупного рогатого скота (КРС) рекомендуется измельчать корнеклубнеплоды до размеров частиц примерно 10 – 15 мм [69]. Это позволяет достичь лучшего проникновения клеточного сока в корма и обеспечить их более эффективное перемешивание при скармливании вместе с концентрированными и грубыми кормами для КРС, формируя узкие пластиинки с толщиной 5 – 10 мм, шириной 10 – 30 мм и длиной, соответствующей размерам продукта. Проведение операции измельчения корнеклубнеплодов должно быть синхронизировано с процессом кормления и осуществляться непосредственно перед скармливанием либо в строго ограниченный временной интервал, не превышающий 1,5 – 2,0 часа до него, так как под воздействием кислорода в измельченной массе активизируются процессы окисления, приводящие к потери клеточного сока и созданию условий для развития микромицетов (плесени) [1].

Современный парк оборудования для измельчения корнеклубнеплодов представлен разнообразными типами машин (корнерезки, корнетёрки и др.), разные по конструктивному исполнению рабочих органов и обеспечивающей степени измельчения материала. В отечественной и зарубежной практике применяются как серийные промышленные образцы, созданные профильными научно-исследовательскими и конструкторскими организациями, так и оригинальные разработки, реализованные специалистами, рационализаторами предприятий, а также молодыми учеными высших учебных заведений в лице аспирантов и студентов [61].

Выбор измельчителя для кормозаготовительных линий осуществляется на основе сравнительного анализа характеристик стационарных и мобильных агрегатов. Стационарные измельчители интегрируются в кормоцеха, а мобильные (навесные/прицепные) обеспечивают самозагрузку, измельчение и раздачу корнеклубнеплодов [70-79].

Современные измельчители корнеклубнеплодов классифицируются по

конструктивному исполнению рабочих органов на четыре основных типа: дисковые с горизонтальным расположением вала (рисунок 1.2, а), дисковые с вертикальным валом (рисунок 1.2, б), барабанные (рисунок 1.2, в) и аппараты с неподвижными ножами (рисунок 1.2, г).



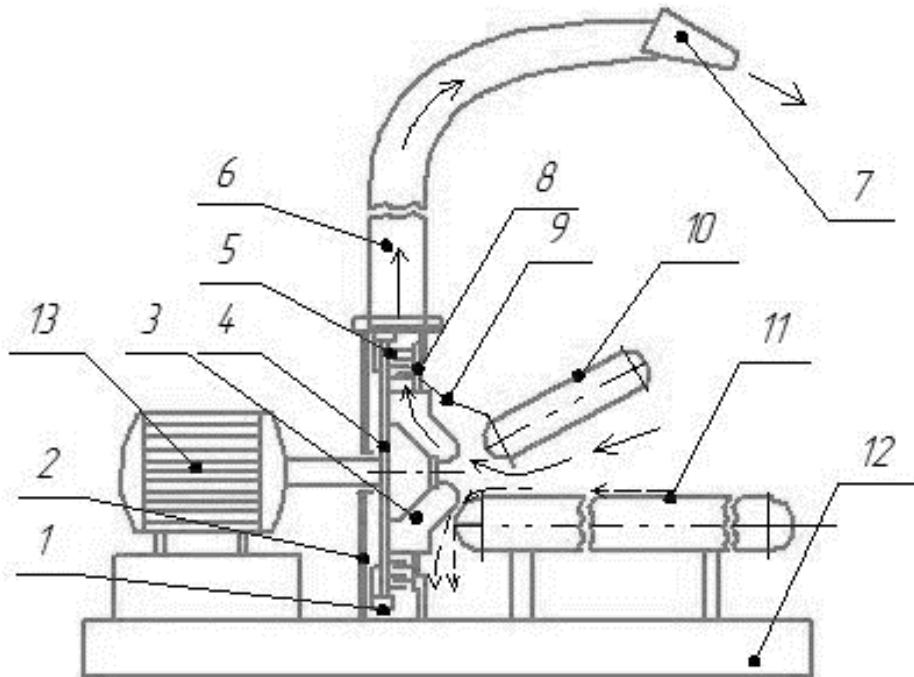
*Рисунок 1.2 – Измельчители корнеплодов: а – дисковые с горизонтальным расположением вала; б – дисковые с вертикальным валом; в – барабанные; г – аппараты с неподвижными ножами*

Конструктивное разнообразие измельчающих устройств дополняется специализированными машинами - корнерезками и корнетёрками, которые отличаются как геометрией режущих элементов, так и конечной дисперсностью получаемого продукта [42].

Измельчитель грубых кормов ИГК-30Б (рис. 1.3) эксплуатируется на фермах КРС и овец в двух модификациях: навесной тракторный (ИГК-30Б-1) и стационарный электрический (ИГК-30Б-П) [60]. Агрегат включает раму, питатель, штифтовый дисковый измельчитель, привод и поворотный дефлектор. Рабочий орган состоит из ротора в камере с неподвижным штифтовым диском, лопаток, отсекателя и редуктора. Камера имеет корпус с обечайкой и четырьмя люками. Неподвижный диск зафиксирован на задней стенке прижимами.

Принцип работы основан на встречном взаимодействии штифтов вращающегося и неподвижного дисков. Измельченный корм выбрасывается

через дефлектор воздушным потоком от лопаток. Отсекатель предотвращает наматывание влажных стеблей на периферийные штифты ротора.

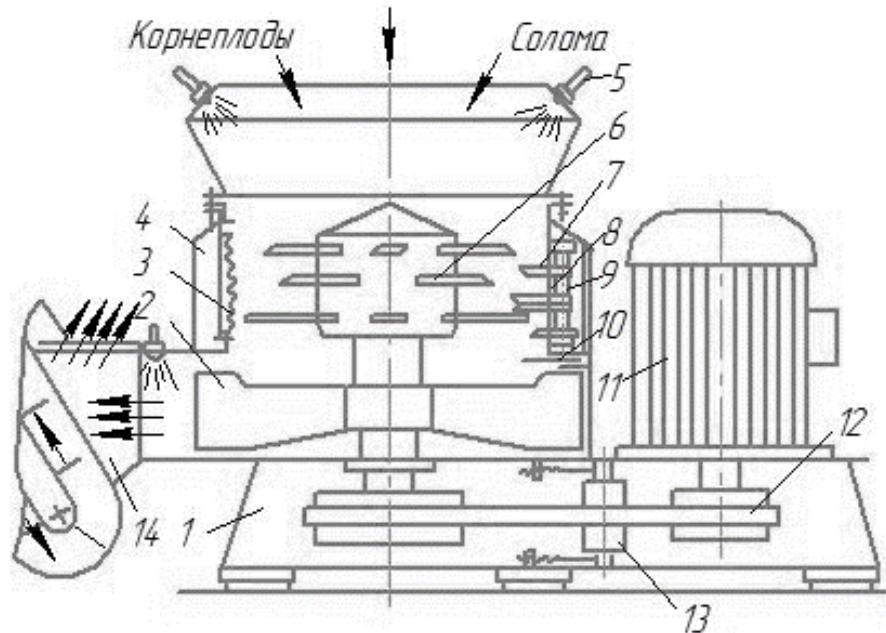


*Рисунок 1.3 – Измельчитель грубых кормов ИГК-30Б: лопатка – 1; корпус – 2; лопастной ротор – 3; подвижный диск – 4; штифты подвижного диска – 5; дефлектор – 6; направляющий козырек – 7; неподвижный диск со штифтами – 8; приемная камера – 9; верхний уплотняющий транспортер – 10; нижний подающий транспортер – 11; рама – 12; электродвигатель – 13*

Принцип работы измельчителя ИГК-30Б основан на ударном и истирающем воздействии штифтов, которые измельчают материал за счёт излома, разрыва и перетирания. Окружная скорость штифтов ИГК-30Б достигает 50 м/с, что позволяет ему работать с соломой влажностью до 25 – 28 %.

Агрегат ИСК-3А (рисунок 1.4) – это технологическая установка для двухстадийного приготовления кормовых смесей путём измельчения грубых кормов любой влажности и их гомогенного смешивания с другими компонентами [76]. Конструкция реализована в виде комплекса модулей, включающего основной рабочий узел, транспортер выгрузки, металлическую опорную стойку и систему управления на основе двух пуско-защитных

блоков. Корпус агрегата смонтирован на раме 1 и объединяет три технологические зоны: приемную камеру I с бункером, рабочую камеру II и выгрузную камеру III. Кинематическая схема агрегата включает ротор с режущими ножами (6), взаимодействующий с декой (3) и противорежущими ножами (1). Привод осуществляется от электродвигателя (11). Конструктивной особенностью является фланцевое соединение между камерами (II и III) с регулируемым шибером (10), позволяющее управлять площадью проходного сечения и интенсивностью выгрузки [6].

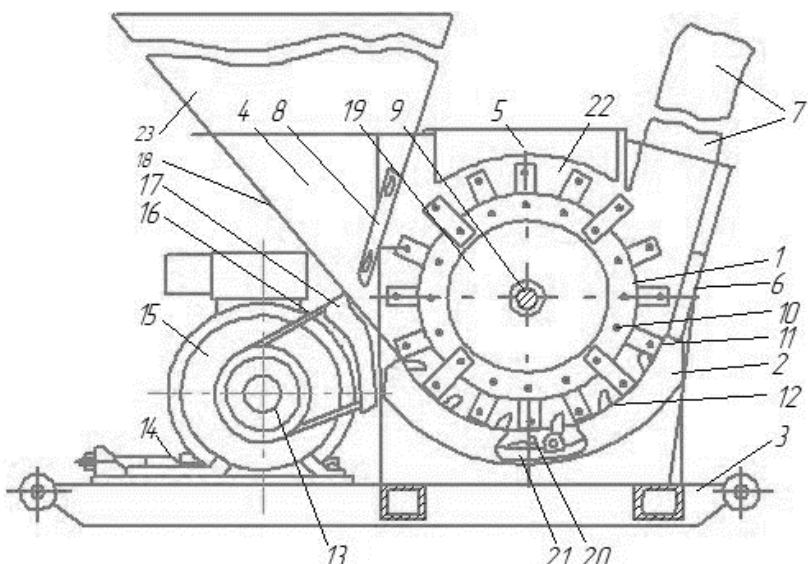


*Рисунок 1.4 – Измельчитель-смеситель кормов ИСК-ЗА: рама – 1; швырялка – 2; зубчатая дека – 3; кожух – 4; форсунка – 5; ротор с ножами – 6; нож противореза – 7; основание – 8; ось – 9; шибер – 10; электродвигатель – 11; клиноременный привод – 12; натяжной ролик – 13; бункер выгрузного транспортера – 14*

Технологический процесс работы измельчителя-смесителя ИСК-ЗА осуществляется по следующему алгоритму. Исходное сырье поступает в приемную камеру I и под действием аэродинамического потока от роторного ускорителя-разбрасывателя 2 транспортируется в рабочую камеру II. В ней под влиянием центробежных сил происходит распределение массы по периферийным стенкам с одновременным измельчением за счет

взаимодействия режущих элементов ротора 6 со стационарными противорежущими пластинами 7, что обеспечивает также интенсивное перемешивание компонентов. В процессе обработки смесь совершает спиралеобразное движение к выходному патрубку. На завершающей стадии готовая кормосмесь направляется в выгрузную камеру III и транспортируется в приемный бункер 14 выгрузного конвейера [77].

Мультифункциональный измельчитель ИРМ-50 (рисунок 1.5) [74] предназначен для использования как в поточных линиях кормоприготовительных цехов, так и в качестве автономного агрегата при приготовлении кормовых мешанок.

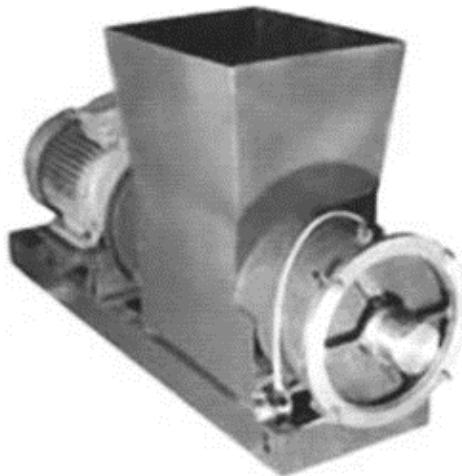


*Рисунок 1.5 – Технологическая схема работы измельчителя ИРМ-50: барабан – 1; дека – 2; рама – 3; камера загрузочная – 4; крышка верхней камеры – 5; рамка – 6; силосопровод – 7; рамка подвижная – 8; вал барабана – 9; ось ножа – 10; нож барабана – 11; нож деки – 12; шкив электромотора – 13; винт натяжного устройства – 14; электродвигатель – 15; ремень клиновой – 16; кожух клиноременной передачи – 17; корпус бункера – 18; диск барабана – 19; бичи деки – 20; сварная дека – 21; верхняя камера – 22; бункер загрузочный – 23*

Агрегат предназначен для измельчения початков кукурузы с повышенной влажностью. Полученный продукт используется при заготовке комбинированного силоса для свиней и приготовлении кукурузного силоса

для крупного рогатого скота из початков в фазе восковой спелости. Регулировка степени измельчения осуществляется двумя способами: путем установки от одного (крупная фракция) до шести (мелкая фракция) рядов противорежущих дек либо изменением частоты вращения барабана посредством двух сменных шкивов, входящих в комплект поставки. Повышение частоты вращения приводит к уменьшению длины частиц корма, что объясняется увеличением кинетической энергии резания и количества контактов режущего органа с материалом в единицу времени.

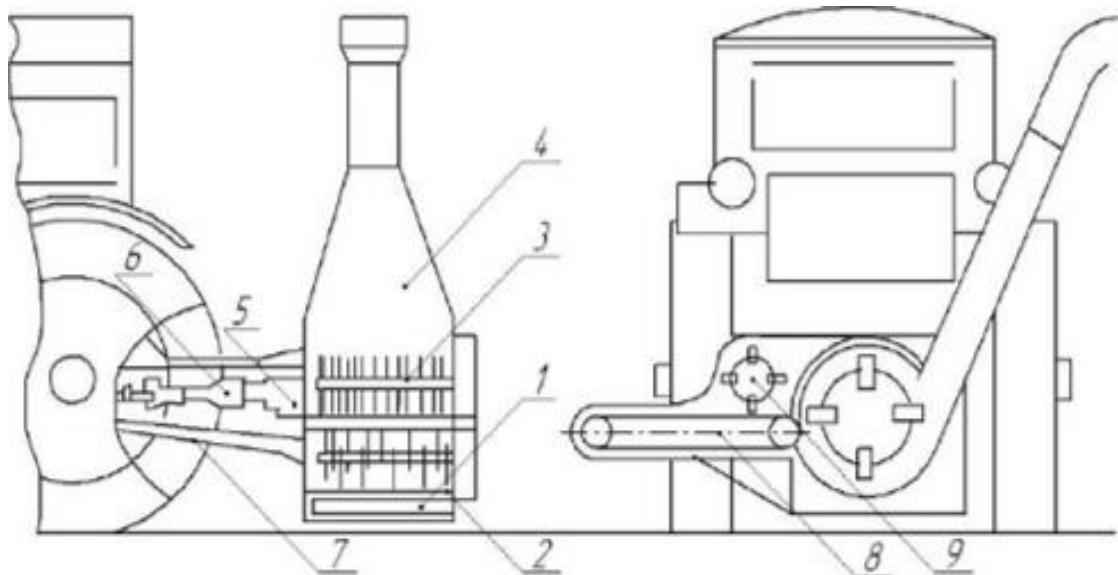
Универсальный агрегат для измельчения кормов АИК (рисунок 1.6) предназначен для обработки широкого спектра растительных материалов: травы, силоса, корнеклубнеплодов, веточного корма и кукурузных початков. Технико-эксплуатационные характеристики агрегата включают переменную производительность в зависимости от вида сырья: при работе с сеном и соломой до 0,5 т/ч, с травой и силосом – 2 т/ч, с корнеклубнеплодами – до 4 т/ч. Энергетические параметры характеризуются установленной мощностью 5,5 кВт при напряжении питающей сети 380 В. Габаритные размеры агрегата составляют 1300×700×650 мм при массе 110 кг [42].



*Рисунок 1.6 – Агрегат для измельчения кормов АИК*

Малогабаритный универсальный измельчитель кормов МУИК-10 (рисунок 1.7) предназначен для подготовки перед скармливанием как сочных (свекла, тыква, силос), так и концентрированных (зерно, початки кукурузы,

жмых, шрот) кормов. Оборудование может быть интегрировано в состав технологических линий приготовления кормов на животноводческих фермах или применяться автономно в коллективных и фермерских хозяйствах [79].



*Рисунок 1.7 – Малогабаритный универсальный измельчитель кормов МУИК-10: корпус – 1; дека – 2; барабан измельчающий – 3; дефлектор – 4; редуктор – 5; привод – 6; тяга – 7; транспортер питающий – 8; битер-рыхлитель – 9*

Универсальный измельчитель МУИК-10 представляет собой комплексный агрегат, состоящий из сварного корпуса, ленточного транспортера-питателя, приемного битера и измельчающего молоткового барабана. Особенностью его технологической схемы является оснащение деки противорежущими пластинами, загрузочного бункера для зерна и комплекта сменных решет. Данная конструкция обеспечивает возможность гибкой технологической настройки для обработки различных видов кормового сырья. Подача исходного материала в рабочую зону осуществляется посредством ленточного транспортера-питателя, а приводной механизм агрегата может быть адаптирован для работы от электродвигателя или через вал отбора мощности трактора.

Конструкция деки включает четыре ряда утопленных противорежущих пластин и три рифленые планки, что в сочетании с комплектом сменных решет (диаметры отверстий 4, 8, 20 и 40 мм) позволяет точно регулировать фракционный состав готового продукта. В зависимости от вида сырья устанавливается следующий гранулометрический состав: для грубых кормов 20 – 40 мм, для сочных кормов 10 – 15 мм, для зерновых компонентов 1 – 3 мм, для кормовых смесей 30 – 40 мм. Масса оборудования в базовой комплектации составляет 700 кг, а в варианте с электродвигателем 800 кг.

Современный рынок сельскохозяйственного оборудования представлен рядом конструкций кормоизмельчителей, предназначенных для переработки корнеклубнеплодов и других видов кормов в условиях фермерских хозяйств. Анализ технических характеристик и функциональных возможностей позволяет выделить несколько типов устройств, ориентированных на хозяйства разного масштаба:

- бытовые и маломощные измельчители (например, КР-03). Данные модели характеризуются компактными габаритами (до 345×220×270 мм), малым весом (около 8 кг) и невысокой производительностью (до 60 кг/ч). Они предназначены для использования в личных подсобных хозяйствах для измельчения ограниченных объемов корма. Конструктивной особенностью является наличие сменных фрез, позволяющих получать продукт разной фракции – от кашеобразной массы до тонко нарезанных «чипсов»;

- универсальные бытовые измельчители повышенной производительности (например, Терммикс КР-01 и ИР-01). Эти модели занимают промежуточное положение, сочетая относительно высокую производительность (600 кг/ч) с компактными размерами и возможностью работы от бытовой сети 220 В. Их ключевыми особенностями являются продолжительный режим работы (до 6 часов) и оснащение системами безопасности, предотвращающими выброс сырья. Конструкция часто включает асинхронные двигатели, что повышает надежность;

- стационарные измельчители для средних хозяйств (например,

Корнеплодов К-300). Данные аппараты отличаются значительной производительностью (300 кг/ч), мощными электродвигателями (до 2 кВт) и возможностью подключения к сети 380 В. Они рассчитаны на интенсивную эксплуатацию и переработку больших объемов грубых кормов. Конструктивно это более габаритные ( $400 \times 950 \times 1300$  мм) и тяжелые (до 45 кг) установки, часто оснащенные режущими ножами из инструментальной стали;

- промышленные измельчители (например, ИУК-2). Предназначены для крупных фермерских и животноводческих комплексов. Характеризуются высокой производительностью (до 2 т/ч), использованием принципиально иных способов измельчения (послойное вырывание ломтиков) для минимизации потерь сока, а также значительными массогабаритными показателями (масса до 300 кг). Такие машины демонстрируют высокую энергоэффективность и ориентированы на существенную экономию ресурсов в масштабах предприятия.

Вопрос повышения эффективности подготовки кормов для скота посредством измельчения остается критически важным для современного животноводства. Анализ существующих методов и конструкций измельчителей подчеркивает необходимость оптимизации рабочих процессов с учетом влажности корма, частоты вращения ротора и геометрии режущих элементов. При этом, выбор способа измельчения и типа рабочего органа должен основываться на физико-механических свойствах конкретного вида кормового сырья и требуемой дисперсности, необходимой для максимальной усвоемости питательных веществ.

Важно отметить, что соответствие зоотехническим требованиям, включая степень очистки от посторонних включений и размер частиц измельченного корма, является определяющим фактором в обеспечении здоровья и продуктивности животных. Рекомендованный размер частиц корнеклубнеплодов для КРС в диапазоне 10 – 15 мм способствует лучшему смешиванию кормов и усвоению питательных веществ. Анализ конструктивного разнообразия измельчителей, от специализированных

корнерезок до универсальных агрегатов, демонстрирует эволюцию технических средств, направленную на оптимизацию рабочего процесса, интеграцию смежных операций и обеспечение гибкости при подготовке кормовых смесей для разных видов сельскохозяйственных животных.

## **1.5 Анализ теоретических исследований процесса измельчения корнеклубнеплодов**

Теоретические основы процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов были заложены и развиты в работах ряда выдающихся ученых, таких как В.П. Горячкин, В.А. Желиговский, Г.И. Бремер, Г.И. Сабельников, С.М. Мельников, Н.Е. Резник, Л.П. Карташов, И.И. Ревенко, В.В. Шацкий, Н.В. Брагинец, В.И. Шаповалов, С.Ф. Вольвак, С.И. Рустамов, В.И. Передня, С.И. Назаров [80-88]. Проведенные ими исследования позволили раскрыть физико-механическую природу процесса, установить взаимосвязь между параметрами режущего аппарата, свойствами материала и качественными показателями измельчения. Значительным шагом явилась разработка математических моделей, описывающих данный процесс. Однако, в силу его высокой сложности и нелинейности, существующие модели базируются на ряде допущений (идеализация формы и свойств частиц, упрощение картины силового взаимодействия и др.), что обуславливает их ограниченную применимость. Таким образом, актуальной научной задачей остается уточнение и развитие существующих теоретических положений, минимизация упрощающих предположений и создание более комплексных математических моделей.

Энергоемкость процесса измельчения зависит от ряда параметров как обрабатываемого материала, так и применяемого оборудования. В таблице 1.3 систематизированы эмпирические закономерности, установленные исследователями для расчета удельных энергозатрат при использовании различных конструктивных типов измельчителей растительных кормов [89].

Таблица 1.3 – Формулы для расчёта затрат энергии

№	Авторы	Модель
1	П.Р. Риттингер	$A_R = f \cdot (\Delta S) = K_R \cdot x^2,$ (1.1) где $\Delta S$ - приращение удельной площади поверхности, $m^2;$ $x$ - характерный размер частицы до измельчения, м; $K_R$ - коэффициент пропорциональности.
2	В.А. Кирпичев, Кик «Кирпичева-Кика»	$A_K = K_K \cdot m,$ (1.2) где $K_K$ - коэффициент пропорциональности; $m$ - масса разрушающегося куска, кг.
3	Ф.С. Бонд	$A_B = K \sqrt{VS} = K \sqrt{K_K D^3} \cdot \sqrt{K_R D^2} = K_B \cdot D^{2.5},$ (1.3) где $K_B$ – коэффициент пропорциональности.
4	Silver E.A.	$dE = -K(dx/x^n),$ (1.4) где $dE$ – энергия, требуемая на приращение размера $dx$ в размере единицы массы материала; $K, n$ – константы, зависящие от конструктивных особенностей измельчителя и материала. При $n=1$ вышеуказанное уравнение приводится к теории Кирпичева – Кика, при $n=1,5$ – Бонда, а при $n=2$ – Риттингера.
5	С.В. Мельников	$A_{изм} = C_{np} (C_v \lg \lambda^3 + C_s) (\lambda - 1),$ (1.5) где $C_{np}$ – коэффициент, учитывающий свойства материала, способ измельчения, конструктивные особенности измельчителя; $C_v$ – коэффициент, выражающий удельную работу упругих деформаций; $C_s$ – коэффициент, учитывающий работу, затрачиваемую на образование новых поверхностей при измельчении 1 кг зерна; $\lambda$ – степень измельчения.

Согласно теоретическим положениям [90], вид резания жестко закрепленного слоя стеблей определяется углом  $\tau$  между нормалью к режущей кромке и направлением действия силы  $P_r$ .

Классификация видов резания базируется на величине угла  $\tau$ . При  $\tau = 0$  реализуется нормальное резание, характеризующееся перпендикулярным приложением силы к материалу. В диапазоне  $0 < \tau \leq \varphi$  происходит нормально-касательное резание без эффекта проскальзывания. При  $\tau > \varphi$  процесс переходит в режим резания со скольжением, что ведет к росту энергоемкости операции и ухудшению качества режущей поверхности [60, 80-91].

Угол  $\tau$  определяет характер распределения деформаций в поперечном сечении стебля. Повышение концентрации деформационных напряжений может быть достигнуто за счет увеличения скорости резания либо путем перераспределения деформаций из нормального в касательное.

Однако указанные выше термины не применяются на практике в расчетах, поэтому они используются только для анализа и сравнения различных процессов измельчения и общих методов повышения эффективности [60, 92-97].

Многообразие видов кормов, их физико-химических свойств и технологических требований к подготовке, вытекающих из физиологических особенностей питания животных, обусловило создание широкого спектра методов измельчения. Каждый из этих методов опирается на собственную механико-математическую модель или теоретическую базу. В качестве примера можно привести теорию резания, разработанную академиком В.П. Горячкиным, которая нашла применение для анализа процессов измельчения стебельчатых кормов, корнеклубнеплодов и других продуктов. Последующее развитие этой теории осуществлено в трудах академика В.А. Желиговского, доктора технических наук Н.Е. Резника и ряда других исследователей [60, 86-91].

С использованием выражения, критическую силу  $P_k$ , которая способна вызвать процесс резания, можно определить из выражения (1.6):

$$P_k = P_p + T_1 + T_2 \cos\gamma, \quad (1.6)$$

где  $P_p$  – сила резания, Н;  $T_1 = fP_o$  – сила трения, обусловленная действием силы бокового давления  $P_o$ , возникающего при внедрении клина в перерезаемый материал, Н;  $f$  – коэффициент трения;  $T_2 = fN = fR\cos\varphi$  – сила трения на фаске ножа, обусловленная давлением со стороны сдвигаемого материала, Н;  $\gamma$  – угол заточки, град.

Из трех составляющих критической силы наибольшее значение имеет сила резания, которую можно определить по формуле (1.7):

$$P_p = \delta \Delta s \sigma_p, \quad (1.7)$$

где  $\delta$  – толщина или острота лезвия, мкм;  $\Delta s$  - длина загруженной части лезвия ножа, мм;  $\sigma_p$  – нормальные разрушающие напряжения, возникающие в перерезаемом слое, Па.

Анализ формул (1.6) и (1.7) показывает, что величина критической силы детерминирована физико-механическими характеристиками материала (коэффициент трения  $f$ , предел прочности  $\sigma_p$ ), остротой лезвия  $\delta$  и длиной его активной (загруженной) части  $\Delta s$ .

Современный научный аппарат, описывающий процесс измельчения, обширен и разнообразен. В научной литературе представлена его систематизация, согласно которой все теории делятся на три ключевых направления.

К первому направлению относятся теоретические положения, устанавливающие закономерности изменения гранулометрического состава материала в ходе его диспергирования. Предметом изучения здесь являются динамика преобразования фракционного состава и факторы, её определяющие.

Второе направление составляют статистические теории, выражающие закономерности измельчения в виде функциональных зависимостей от свойств как обрабатываемого материала, так и применяемого оборудования. В рамках данного подхода, например, С.Е. Андреевым предложена оценка кинетики процесса на основе убывания массы наиболее крупной фракции.

Третье направление базируется на фундаментальных принципах физики твердого тела. К нему относятся классические законы (Риттингера, Кирпичева, Ребиндера), а также рабочие формулы, такие как формулы Мельникова и Резника [60, 90-98]. Исследования в этой группе основаны на физических принципах и моделях твердого тела, и направлены на понимание механизмов измельчения и определение оптимальных параметров процесса.

Таким образом, классификация теорий измельчения позволяет систематизировать и организовать знания в этой области и облегчает

дальнейшие исследования и разработку методов и технологий измельчения материалов [90-99].

Анализ теоретической базы исследования, проведенный на основе литературных источников, показывает, что практические проблемы современных измельчителей корнеклубнеплодов требуют дальнейших исследований и совершенствования с целью оптимизации параметров энергопотребления. В частности, основными недостатками являются невозможность получения продукта с однородным гранулометрическим составом и соответствующим качеством, большие габариты и высокая пылевидная фракция в конечном продукте. Поэтому устраниению указанных недостатков может способствовать разработка новых измельчителей, одним из которых является ножевой барабан с конусной камерой измельчения для многоступенчатого резания.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Повышение эффективности кормления достигается оптимизацией степени измельчения корма в соответствии с зоотехническими нормативами. Превышение требуемой тонкости помола (переизмельчение) негативно влияет на здоровье и продуктивность животных, увеличивает энергопотребление технологического процесса и усложняет условия труда обслуживающего персонала.

2. Ключевой технологической задачей при подготовке кормов является обеспечение заданной дисперсности, соответствующей физиологическим потребностям различных видов животных и исключающей риск травматизации желудочно-кишечного тракта.

3. Результаты исследований, выполненных научными учреждениями и подтвержденные производственной практикой, свидетельствуют, что оптимальная подготовка кормов для сельскохозяйственных животных предполагает их обязательное измельчение при строгом соблюдении установленных качественных и зоотехнических требований.

Технологический процесс приготовления кормов включает следующие основные этапы:

- предварительная очистка сырья от минеральных (грунт, песок, камни) и иных посторонних примесей, способных вызывать механические повреждения пищеварительного тракта;
- измельчение до степени, регламентированной для конкретного вида и производственной группы животных (крупный рогатый скот, свиньи, птица);
- обеспечение высокой гомогенности (однородности) готовой кормосмеси;
- минимизация доли мелкодисперсной фракции в конечном продукте.

Все эти меры направлены на обеспечение здорового и сбалансированного рациона для животных, что является приоритетом в процессе подготовки кормов.

На основе проведения анализов конструкций, существующих измельчителей кормов выявлено, что современные измельчители не в полной мере соответствуют предъявляемым требованиям, как в плане зоотехнических требований по качеству измельченного материала, так и по энергетическим показателям. Выявлены недостатки существующих измельчителей. Основными недостатками являются большая металлоемкость и энергопотребление, также недостаточная эффективность измельчения.

## Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ

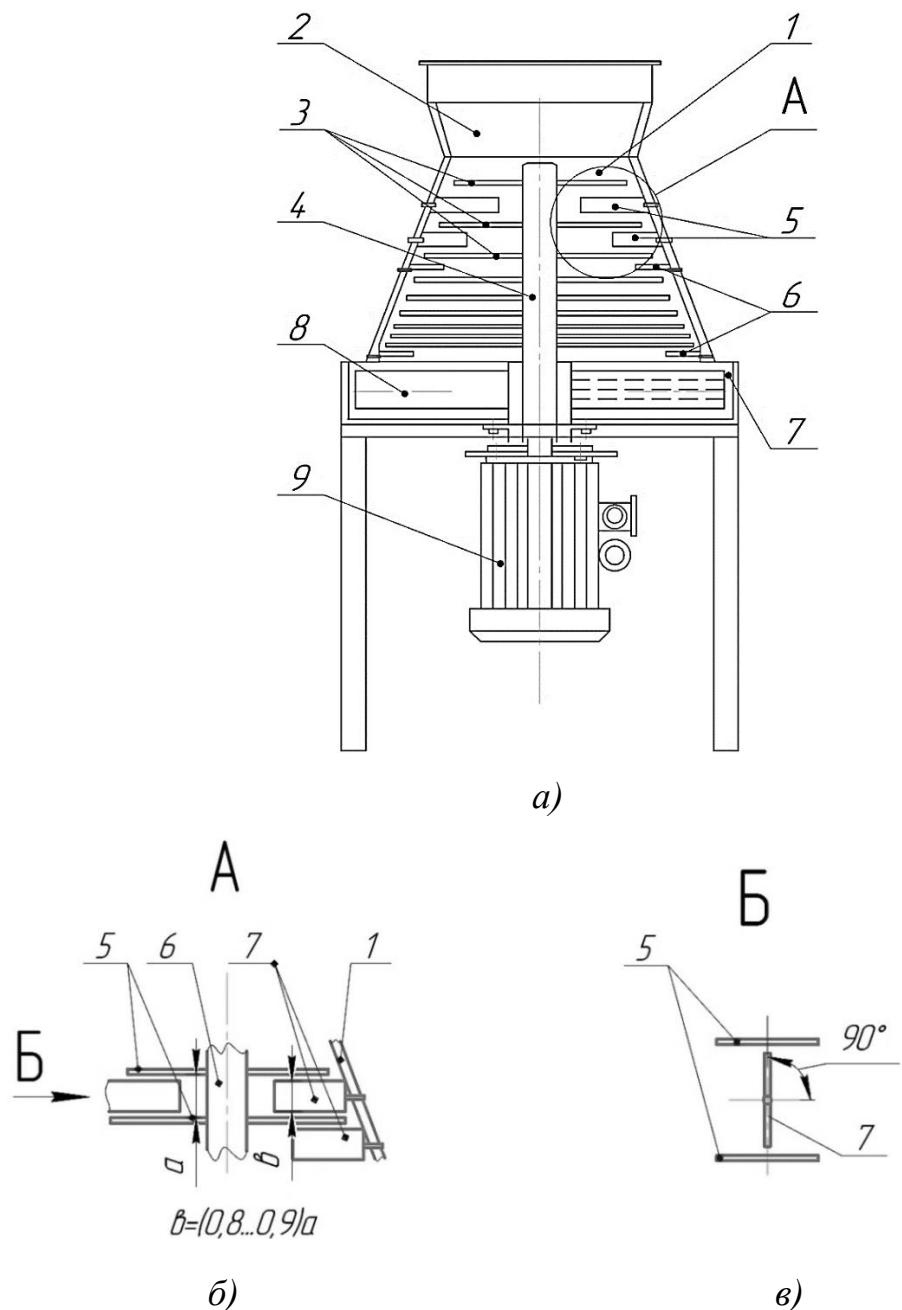
### 2.1 Конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов

Потребность в энергоэффективном измельчительном оборудовании для малых фермерских хозяйств обусловлена их ограниченными энергоресурсами. Это определяет необходимость создания компактного агрегата с низким энергопотреблением, обеспечивающего получение кормовой смеси с выровненной гранулометрической характеристикой [88, 100]. На основе проведенных исследований рабочего процесса измельчения кормов установлено, что на энергетические и качественные показатели работы измельчителя-смесителя оказывают влияние большое количество факторов [42]. И для улучшения качества кормов, измельчение продукта должно протекать при последовательном уменьшении размеров получаемого корма до необходимых параметров по зоотехническим требованиям с непрерывной загрузкой исходного материала и разгрузкой готового продукта [60]. На основе вышесказанного и с учетом анализа конструкций для приготовления измельченных кормов, необходимо разработать техническое решение, позволяющее снизить затраты труда, средств и энергии [101].

На рис. 2.1 представлен измельчитель-смеситель корнеклубнеплодов, который включает 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 швырялкой 8 и электродвигателя 9 (рисунок 2.1) [102-105].

Измельчающие ножи 3 расположены с постоянным и равномерным

уменьшением расстояния друг от друга на 10 – 20 % начиная от верхнего ножа к нижнему, а рабочая камера выполнена в виде усеченного конуса.



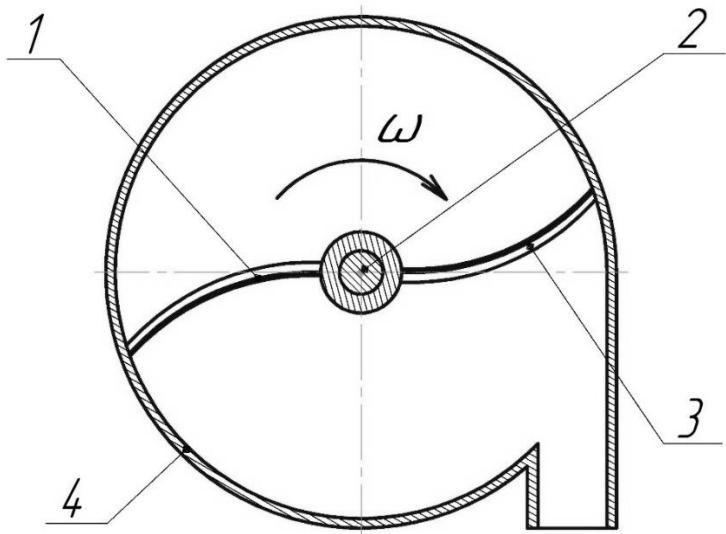
*Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов: а) общий вид; б) вид А – взаимное расположение измельчающих и направляющих пластин; в) вид Б – к обоснованию угла поворотных направляющих пластин: камера измельчения – 1; бункер приемный – 2; ножи измельчающие – 3; вал ротора – 4; поворотные направляющие пластины – 5; противорезы – 6; камера выгрузная – 7; швырятка лопастная – 8; электродвигатель – 9*

Поступающий в рабочую камеру материал попадает в зону измельчения ножей с большим расстоянием между ними, чем в нижней части рабочей камеры, а, следовательно, измельчение проходит последовательно, с уменьшением размеров получаемого корма до необходимых по зоотехническим требованиям. Нагрузка на ножи при этом – равномерная по всей длине рабочей камеры. Кроме этого, выполнение рабочей камеры в виде усеченного конуса, а, следовательно, увеличение диаметра рабочей камеры в нижней части измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов позволяет измельченному корму свободно перемещаться в выгрузную камеру без переизмельчения.

Направляющие пластины 5 (рисунки 2.1 б и 2.1 в) имеют возможность поворота и фиксации под углом от 0° до 90° к измельчающему ножу 3, а ширина пластин равна 0,8 – 0,9 расстояния между измельчающими ножами [106-109].

Лопастная швырялка 1 (рисунок 2.2) закреплена жестко на валу 2 ротора измельчителя-смесителя и представляет вогнутую пластину, на которой перпендикулярно к её поверхности установлены режущие ножи 3.

Измельчитель-смеситель корнеклубнеплодов работает следующим образом. Кормовая масса загружается в приемный бункер 2 и под действием силы тяжести и массы корма перемещается к нижней части рабочей камеры 1, измельчаясь ножами 3 и противорезами 6. В связи с тем, что ножи в рабочей камере расположены с постоянным и равномерным уменьшением расстояния друг от друга на 10 – 20 % начиная от верхнего ножа к нижнему, измельчение проходит последовательно, с уменьшением размеров получаемого корма до необходимых по зоотехническим требованиям. Нагрузка на ножи при этом – равномерная по всей длине рабочей камеры. Кроме этого, выполнение рабочей камеры в виде усеченного конуса, а, следовательно, увеличение диаметра рабочей камеры в нижней части измельчителя-смесителя кормов позволяет измельченному корму свободно перемещаться в выгрузную камеру 7 без переизмельчения [106].



*Рисунок 2.2 – Камера выгрузная: швырятка лопастная – 1; вал ротора измельчителя-смесителя – 2; ножи швырятки – 3; стенка выгрузной камеры – 4*

Для изменения интенсивности воздействия рабочих органов и времени нахождения кормовой смеси в рабочей зоне измельчителя-смесителя кормов имеются поворотные направляющие пластины 5, которые можно установить на фиксированный угол от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  по отношению к измельчающим ножам.

Кормовая масса выгружается в виде измельченного корма лопастной швыряткой 8, при вращении которой измельчённая масса перемещается по поверхности лопастей от центра к стенкам выгрузной камеры, а режущие ножи дополнительно измельчают корм. Вогнутая форма лопасти позволяет перемещать измельченный материал из центральной части к стенкам 4 выгрузной камеры и далее из устройства [102].

Предлагаемая конструкция обладает рядом преимуществ: благодаря равномерной подаче сырья на режущие органы и его последовательному измельчению до требуемой дисперсности, что обеспечивается конической формой рабочей камеры [102]. Интенсивность технологического процесса регулируется посредством изменения угла наклона поворотных направляющих пластин. Конструктивное исполнение также способствует снижению энергопотребления агрегата, что достигается за счет свободного

сброса измельченного продукта в выгрузную камеру и применения лопастной швырялки оригинальной формы [106].

Реализация рабочей камеры в форме усеченного конуса рассматривается как ключевое решение для обеспечения эффективного транспортирования материала, интенсификации процесса смещивания и достижения заданной однородности продукта. Такое конструктивное решение позволяет улучшить качество корма за счет равномерной подачи материала на ножи, последовательного уменьшения размеров до необходимых параметров, возможности настройки интенсивности процесса и свободной выгрузки измельченного материала.

## **2.2 Определение пропускной способности измельчителя-смесителя и степени измельчения корнеклубнеплодов**

Наиболее энергоемкой операцией в цикле приготовления кормов выступает процесс измельчения, потребляющий до 50% от общего объема электроэнергии. Сохраняет актуальность проблема оптимизации энергозатрат, что определяет необходимость решения задач по снижению удельной энергоемкости процесса и минимизации потерь питательных веществ при одновременном повышении его качественных показателей.

Рабочий процесс резания включает стадии уплотнения материала и собственно резания, приводящего к уменьшению линейных размеров частиц, увеличению их количества и общей площади поверхности. На энергоемкость процесса существенно влияют такие факторы, как тип и влажность материала, скорость резания, угол скольжения, а также конструкция и пространственная ориентация режущего органа относительно обрабатываемого материала [101, 107, 108].

Удельная энергоёмкость процесса измельчения является ключевым энергетическим показателем эффективности работы агрегата и рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{уд}} = W/Q, \quad (2.1)$$

где  $W$  – мощность, подводимая к ротору измельчителя-смесителя, кДж/кг;  $Q$  – производительность (пропускная способность) измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, кг/с.

Производительность (пропускная способность) измельчителя-смесителя определяется на основе объема материала, срезаемого режущими органами за единицу времени. Ключевым параметром для данного расчета является площадь поперечного сечения стружки, формируемой одним ножом при его взаимодействии с материалом [100-102]. Эта площадь зависит от геометрических параметров режущего инструмента, физико-механических характеристик обрабатываемого материала и режимов работы агрегата. Указанный параметр служит основой для последующего вычисления объемной производительности с учетом количества режущих органов и частоты вращения рабочего органа. Необходимо отметить, что пропускная способность разрабатываемого измельчителя-смесителя зависит только от скорости подачи материала через приемный бункер 2, если материал не сгруживается, при последующем перемещении в камере измельчения 1 и на выгрузном устройстве 6 (рисунок 2.1). То есть уплотнение материала в процессе резания не сопровождается сопротивлением входу следующей порции в камеру измельчения, при установленном режиме работы.

В этом случае пропускная способность  $Q$  (кг/с) определяется по выражению:

$$Q = k_0 \rho v_0 S, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – плотность исходного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $v_0$  – скорость подачи, м/с;  $S$  – площадь поперечного сечения горловины камеры измельчения, м<sup>2</sup>;  $k_0$  – коэффициент заполнения сечения горловины материалом.

Степень измельчения зависит от количества ножей, частоты их вращения и скорости перемещения материала в осевом направлении камеры. На последний фактор оказывает существенное влияние установка направляющих пластин и противорезов. Размер порции материала определим

как произведение скорости подачи  $v_0$  и времени очередного подхода верхнего ножа к горловине:

$$d_0 = v_0 t_0, \quad (2.3)$$

где  $t_0 = \frac{\pi}{\omega}$ , причем  $\omega$  – угловая скорость (рад/с) ротора с ножами, а  $\pi$  – угол, соответствующий половине оборота двойного ножа на верхнем уровне, то есть

$$d_0 = v_0 \frac{\pi}{\omega}, \quad (2.4)$$

Степень измельчения последующими ножами определяется как отношение

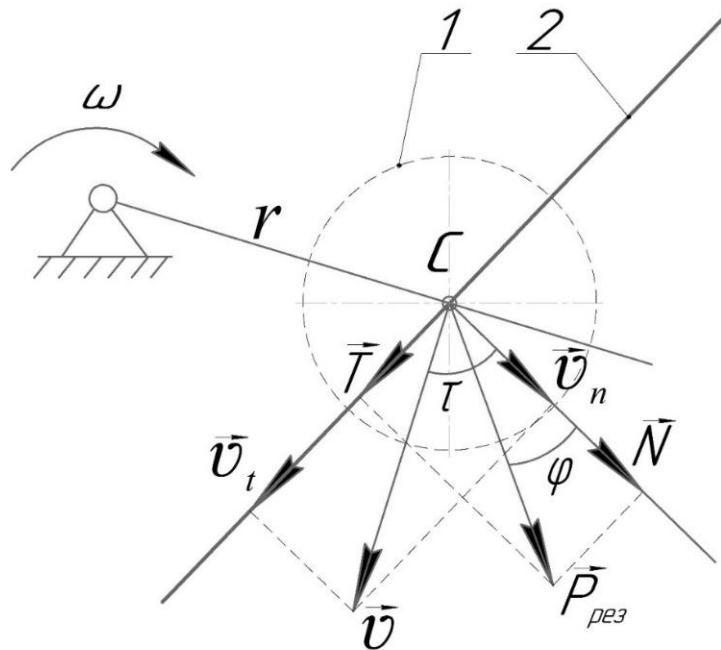
$$n = \frac{d_0}{d_K}, \quad (2.5)$$

где  $d_K$  – средний размер частиц на выходе из измельчителя-смесителя, м.

Полученные выражения позволяют вычислить производительность разрабатываемого измельчителя-смесителя, учитывая коэффициент заполнения и степень измельчения. Используя расчетные значения пропускной способности можно определить удельную энергоемкость процесса измельчения, для чего необходимо также знать мощность, подводимую к ротору измельчителя-смесителя, которую можно определить, зная энергозатраты при измельчении кормов.

## 2.3 Определение энергоемкости измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов

Для определения энергозатрат при резании исходного материала ножом рассмотрим схему силового взаимодействия ножа и материала [110, 111] (рисунок 2.3).



*Рисунок 2.3 – Схема разложения сил резания на составляющие: горловина камеры измельчения – 1; нож измельчающий – 2; угловая скорость ротора –  $\omega$ ; расстояние от точки резания до оси вращения ножа –  $r$ ; точка резания –  $C$ ; нормальная составляющая силы резания –  $\vec{N}$ ; касательная составляющая силы резания –  $\vec{T}$ ; угол скользящего резания –  $\tau$ ; сила скользящего резания –  $\vec{P}_{рез}$ ; угол трения –  $\varphi$ ; скорость резания –  $\vec{v}$ ; касательная составляющая скорости резания –  $\vec{v}_t$ ; нормальная составляющая скорости резания –  $\vec{v}_n$*

При скользящем резании силу резания можно разложить на составляющие

$$\vec{P}_{рез} = \vec{N} + \vec{T}, \quad (2.6)$$

где  $\vec{N}$  – нормальная составляющая силы резания, перпендикулярная к линии ножа,  $N$ ;  $\vec{T}$  - касательная составляющая.

Причем

$$T = Nf', \quad (2.7)$$

где  $f'$  – коэффициент скользящего резания.

Момент сил резания складывается из суммы моментов двух этих составляющих

$$M_{\text{рез}} = T r \sin(\tau) + N r \cos(\tau) = N r \cos(\tau) (1 + f' \operatorname{tg}(\tau)), \quad (2.8)$$

где  $r$  – расстояние от точки резания до оси вращения ножа, м;  $\tau$  – угол скользящего резания, град.

Угол  $\tau$  определяется как угол между вектором скорости точки ножа и нормалью к линии лезвия ножа.

Величина нормальной составляющей силы резания равна

$$N = q \Delta l, \quad (2.9)$$

где  $q$  – удельная линейная сила ножа, Н/м;  $\Delta l$  – длина нагруженной части лезвия, м.

Мощность силы резания с учетом (2.8) и (2.9) определится так

$$W_{\text{рез}} = M_{\text{рез}} \omega = q \Delta l r \omega \cos(\tau) (1 + f' \operatorname{tg}(\tau)). \quad (2.10)$$

Площадь, которую прорезает лезвие длиной  $\Delta l$  в единицу времени  $\frac{\Delta S}{dt}$

$$\frac{\Delta S}{dt} = \Delta l r \omega \cos(\tau) \quad (2.11)$$

Работа, отнесенная к единице площади среза  $A_{\text{уд}}$

$$A_{\text{уд}} = \frac{A}{\Delta S} = \frac{W_{\text{рез}}}{\left(\frac{\Delta S}{dt}\right)} = q (1 + f' \operatorname{tg}(\tau)). \quad (2.12)$$

Тогда работа на первый одиночный срез верхним ножом определится так

$$A_1 = A_{\text{уд}} k_0 S = q (1 + f' \operatorname{tg}(\tau)) k_0 S. \quad (2.13)$$

Причем для усредненных расчетов принимаем угол  $\tau$  в положении лезвия при проходе им центра загрузочной горловины.

Величина удельной линейной силы ножа в случае резания без скольжения,  $q_0$  зависит от свойств материала и заточки ножа. Н.Е. Резник [18, 101] предложил, определять ее по выражению:

$$q_0 = \delta \sigma_p + \frac{E h_{\text{сж}}^2}{2 h} (\operatorname{tg}(\beta) + f \sin^2(\beta) + \mu(f + \cos^2(\beta))), \quad (2.14)$$

где  $\delta$  – острота (толщина) лезвия, м;  $\sigma_p$  – разрушающее напряжение, Па;  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $h_{сж}$  – толщина сжимаемого лезвием ножа материала до момента начала резания, м;  $h$  – толщина слоя перерезаемого материала, м;  $\beta$  – угол заточки лезвия ножа, град.;  $f$  – коэффициент трения лезвия ножа о материал;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Удельная линейная сила ножа в случае резания со скольжением, снижается с увеличением угла резания по эмпирическому соотношению [101, 112]:

$$q = q_0 - \alpha' \tau, \quad (2.15)$$

где  $\alpha'$  – коэффициент,  $\alpha' = 50 \dots 60$  при  $q_0$  в Н/м и  $\tau$  в градусах [14].

Представим это соотношение в виде

$$q = q_0 \left( 1 - \alpha \frac{\tau}{90^\circ} \right), \quad (2.16)$$

где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент, определяемый по экспериментальным данным (принимался равным  $\alpha = 0,5 - 0,6$ ).

Примем допущение для усредненных характеристик взаимодействия ножей и частиц материала о том, что каждый ряд ножей при воздействии на каждую частицу разрезает ее на две части, так что средняя длина частиц уменьшается в два раза, а количество частиц, переходящих на следующий ряд ножей увеличивается в два раза. Это утверждение справедливо при измельчении вытянутых по одному измерению частиц. При переходе на следующую ступень резания (на ниже установленный ряд ножей) площадь материала, которую необходимо разрезать удваивается, так что на каждом ряде ножей

$$S_i = 2^{(i-1)} S; i = 1, \dots, k. \quad (2.17)$$

Работа резания на каждом ряде ножей для одного ножа в ряду равна

$$\begin{aligned} A_2 &= 2A_{уд} k_0 S = 2q_2 (1 + f' \operatorname{tg}(\tau_2)) k_0 S; \\ A_i &= 2^{(i-1)} A_{уд} k_0 S = 2^{(i-1)} q_i (1 + f' \operatorname{tg}(\tau_i)) k_0 S; \\ A_k &= 2^{(k-1)} A_{уд} k_0 S = 2^{(k-1)} q_k (1 + f' \operatorname{tg}(\tau_k)) k_0 S. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для каждого ряда  $i = 1, \dots, k$  диапазон угла  $\tau_i$  и  $q_i$  по выражению (2.16) будут различными. Возьмем усредненные значения при расчете каждого ряда ножей. Если форма частиц близка к кубу, то при однократном срезе на две части степень изменения площади среза стремится к  $\sqrt[3]{2}$ . Начиная с некоторого ряда ножей, размер частиц по трем измерениям будет сближаться и, кроме того, не каждая частица перерезается нижерасположенным ножом, поэтому степень изменения площади среза отличается в меньшую сторону и может быть меньше единицы. В случае, если принятое допущение об удвоении площади среза не справедливо, то можно задавать степень измельчения в каждом ряду ножей индивидуально. Отметим, что регулированием угла установки и положением направляющих пластин возможно изменять количество срезов каждым рядом ножей. Тогда, задавая индивидуально степень измельчения на каждой ступени, выражение (2.18) примет вид:

$$A_i = A_{\text{уд}} k_0 S \prod_{l=1}^{i-1} u_l = q_i (1 + f' \operatorname{tg}(\tau_i)) k_0 S \prod_{l=1}^{i-1} u_l, \quad (2.19)$$

где  $\prod_{l=1}^{i-1} u_l$  – произведение степеней измельчения  $u_l$  на каждом ряде ножей с первого до предыдущего  $u_{i-1}$ .

Причем, для  $i = 1$  принимаем  $u_{1-1} = 1$ , так как первый ряд ножей определяет размер исходной частицы материала, подлежащих последующему перерезанию.

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

$$A_{\text{сум}} = 2 \sum_{i=1}^k A_i. \quad (2.20)$$

Время одного оборота ротора

$$t = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Тогда мощность сил резания определим так

$$W_{\text{рез}}^{\text{сум}} = \frac{A_{\text{сум}}}{t} = \frac{\omega}{\pi} \sum_{i=1}^k A_i, \quad (2.21)$$

где  $k$  – количество рядов ножей,  $k = 3 \dots 9$ .

Суммарный момент сил резания равен коэффициенту при угловой скорости в выражении мощности (2.21)

$$M_{\text{рез}}^{\text{сум}} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^k A_i. \quad (2.22)$$

Кроме затрат мощности на процесс резания энергия расходуется на перемещение материала к периферии камеры измельчения и на холостой ход ротора. Расход мощности на перемещение материала определим с помощью теоремы об изменении кинетического момента:

$$\frac{dK}{dt} = M - M_{\text{рез}}^{\text{сум}} - M_{\text{хх}}, \quad (2.23)$$

где  $M$  – момент, подводимый к ротору от двигателя;  $(-M_{\text{хх}})$  – момент, расходуемый на холостой ход;  $K$  – кинетический момент ротора и материала в измельчителе;  $(-M_{\text{рез}}^{\text{сум}})$  – момент внешних сил со стороны камеры измельчения с противорезами относительно оси вращения.

Выразим из уравнения (2.23) момент, подводимый к ротору

$$M = M_{\text{рез}}^{\text{сум}} + M_{\text{хх}} + \frac{dK}{dt}. \quad (2.24)$$

Кинетический момент относительно оси вращения  $K$ , с учетом малости момента относительной скорости материала по сравнению с переносной, равен

$$K = J\omega + Q t r^2 \omega_M, \quad (2.25)$$

где  $\omega_M$  – угловая скорость материала в камере измельчения, равна  $\omega$  на выходе из измельчителя-смесителя и равна нулю на входе.

При установившемся режиме первое слагаемое в выражении (2.25) постоянно. Тогда, при нулевой угловой скорости на входе материала, получим

$$K_0 = J\omega;$$

$$K_K = J\omega + Q t r_k^2 \omega;$$

$$\frac{dK}{dt} = \frac{K_K - K_0}{t} = Q r_k^2 \omega. \quad (2.26)$$

### Мощность на разгон материала

$$W_m = \frac{dK}{dt} \omega = Q r_k^2 \omega^2. \quad (2.27)$$

Таким образом, средняя мощность подводимая к ротору  $W$  определится так:

$$W = W_{рез}^{сум} + W_m + W_{xx}, \quad (2.28)$$

где  $W_{xx}$  – мощность на холостой ход.

Принимается  $W_{xx} = (0,15 - 0,2)(W_{рез}^{сум} + W_m)$ , либо определяется экспериментально. В затраты на холостой ход включены непродуктивные затраты энергии на перемешивание материала – преодоление трения частиц о стенки камеры и друг о друга [101].

Подставив в формулу (2.1) выражения по определению мощности, подводимой к ротору и пропускной способности измельчителя-смесителя можно рассчитать величину удельной энергоёмкости измельчения:

$$E_{уд} = \frac{W}{Q} = \frac{W_{рез}^{сум} + W_m + W_{xx}}{k_0 \rho v_0 S}. \quad (2.29)$$

Результаты исследования позволили идентифицировать ключевые факторы, определяющие производительность измельчителя-смесителя кормов. К ним относятся: кинематические и геометрические параметры режущих органов (частота вращения ротора, количество и геометрия ножей), площадь резания за один оборот, а также конструктивные характеристики направляющих пластин (угол наклона, количество) и противорежущих элементов (число, размеры).

Теоретически подтверждена зависимость энергоемкости процесса измельчения от ряда конструктивных и режимных параметров агрегата: количества и геометрии режущих и противорежущих ножей, частоты вращения ротора и геометрических параметров лопастной швырялки. На основе анализа получены аналитические выражения для расчета работы резания на отдельных рядах ножей и суммарной работы за один оборот ротора [60].

## **2.4 Алгоритм и программа численного расчета параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов**

Исходя из полученных теоретических исследований был составлен алгоритм расчета и написана программа на языке C# в среде разработки приложений Visual Studio (Приложение А1). Исходные данные вводятся в таблицы экранной формы (Приложение А2). Для первого и последующих рядов ножей радиус точки резания определялся как расстояние от оси ротора до точки, находящейся на 2/3 по режущей кромке ножа от оси вращения, так как эта точка является центром тяжести эпюры распределенных сил резания. Разработанный алгоритм и реализованная программа представляют собой эффективный инструмент для численного анализа параметров измельчителя-смесителя.

Результаты вычислений вместе с исходными данными представлены в приложениях А3 и А4.

Ввод исходных данных посредством таблиц экранной формы обеспечивает удобство и наглядность процесса, а представление результатов вычислений в совокупности с исходными данными облегчает их интерпретацию и анализ.

Отметим, что большое количество эмпирических справочных исходных данных усложняют перенос результатов расчета на проектируемые устройства, но позволяют оценить тенденции влияния различных факторов на показатели процесса измельчения.

## **2.5 Обоснование формы лопасти швырялки выгрузной камеры измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов**

Целью исследования является определение радиуса кривизны лопасти швырялки выгрузной камеры, а также направления ее изгиба. Заданные значения угловой скорости, начального и конечного расстояния от оси ротора

считаем определенными по обоснованию процесса резания ножами на том же валу.

Примем форму лопасти в виде цилиндрической поверхности с постоянным радиусом кривизны, в сечении горизонтальной плоскостью это окружность. Начальный отрезок движения материала по окружности направим по радиусу ротора с целью обеспечить максимальный разгон центробежной силой материала с нулевой начальной относительной скоростью. Рассмотрим движение в горизонтальной плоскости совокупности массы измельченного корма, взаимодействующей с лопастью швырялки (рисунок 2.4). Для составления уравнений движения используем теорему о движении центра масс в относительном движении:

$$m\vec{W} = m\vec{g} + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_C, \quad (2.30)$$

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.

Причем коэффициент трения отражает и силу резания в процессе движения по ножам лопасти.

### **2.5.1 Лопасти, загнутые по направлению вращения (вогнутые)**

Для лопасти загнутого по направлению вращения нормальная реакция  $\vec{N}_1$  направлена в сторону вогнутости траектории на центр кривизны  $O_1$  (рисунок 2.4).

Спроецируем уравнение (2.30) на естественные оси координат  $(\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{b})$ , с учетом величин касательного  $W_t = \ddot{\sigma}$ , нормального  $W_n = \frac{\dot{\sigma}^2}{R}$  ускорений и направления  $\vec{N}_1$ :

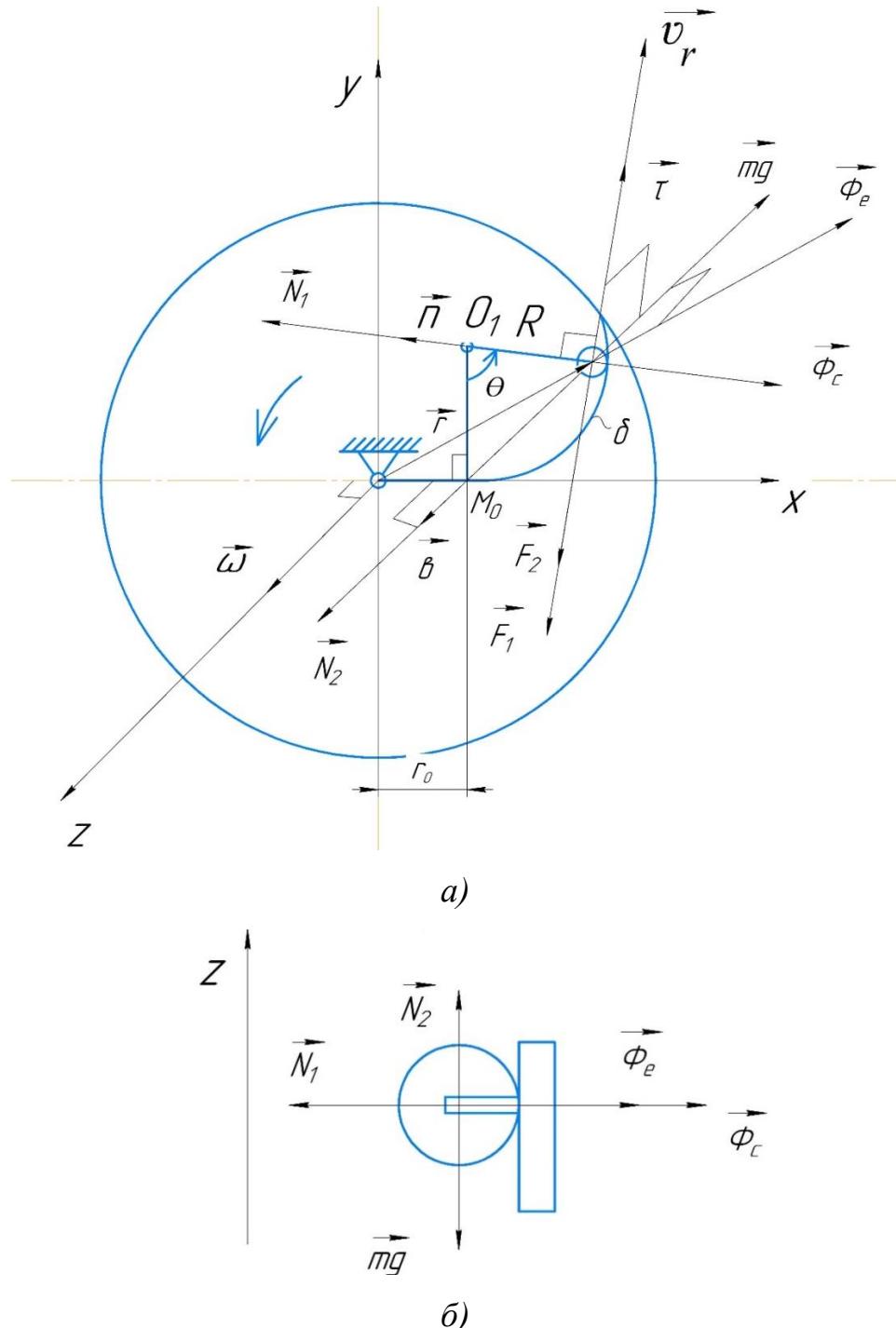


Рисунок 2.4 – Силы, действующие на массу измельченного корма в относительном движении при лопасти загнутой по направлению вращения:  
а) вид сверху, б) в сечении вертикальной плоскости, перпендикулярной касательной  $\vec{\tau}$

$$\begin{cases} m\ddot{\sigma} = \Phi_{e\tau} - F_1 - F_2; \\ m\frac{\dot{\sigma}^2}{R} = \Phi_{en} + N_1 - \Phi_C; \\ 0 = N_2 - mg, \end{cases} \quad (2.31)$$

где  $R$  – радиус кривизны лопасти, м.

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 скорость  $\vec{\omega}$  против хода часовой стрелки вокруг оси  $z$ .

Центробежная переносная сила инерции

$$\vec{\Phi}_e = m\omega^2 \vec{r}. \quad (2.32)$$

Проекции вектора  $\vec{r} = \vec{r}(x, y)$  на оси  $x, y$ , тогда:

$$\begin{cases} \Phi_{ex} = m\omega^2 x; \\ \Phi_{ey} = m\omega^2 y; \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + R\sin(\theta); \\ y = R - R\cos(\theta), \end{cases}$$

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

Проекции силы  $\vec{\Phi}_e$  на естественные оси координат  $\vec{t}, \vec{n}$  запишем в виде

$$\begin{cases} \Phi_{e\tau} = \Phi_{ex} \cos(\theta) + \Phi_{ey} \sin(\theta); \\ \Phi_{en} = -\Phi_{ex} \sin(\theta) + \Phi_{ey} \cos(\theta). \end{cases} \quad (2.34)$$

Сила инерции Кориолиса равна взятому с противоположным знаком ускорению Кориолиса, умноженного на массу:

$$\vec{\Phi}_C = -2m\vec{\omega} \times \dot{\sigma}\vec{t},$$

где  $\vec{v}_r = \dot{\sigma}\vec{t}$ , – относительная скорость;  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости лопасти.

По величине сила инерции Кориолиса равна (знак учтен направлением на рисунке 2.4):

$$\Phi_C = 2m\omega\dot{\sigma}. \quad (2.35)$$

По закону Кулона, сила трения определится через нормальную реакцию и коэффициент трения  $f$ :

$$F_1 = N_1 f; \quad (2.36)$$

$$uF_2 = N_2 f. \quad (2.37)$$

Подставим величины сил в уравнения (2.31) и разделим на массу  $m$ , получим

$$\begin{cases} \ddot{\sigma} = \omega^2(r_0 + R\sin(\theta))\cos(\theta) + \omega^2(R - R\cos(\theta))\sin(\theta) - \frac{N_1}{m}f - \frac{N_2}{m}f; \\ \frac{\dot{\sigma}^2}{R} = -\omega^2(r_0 + R\sin(\theta))\sin(\theta) + \omega^2(R - R\cos(\theta))\cos(\theta) + \frac{N_1}{m}f - 2\omega\dot{\sigma}; \\ 0 = \frac{N_2}{m}f - g; \end{cases} \quad (2.38)$$

С учетом выражения для угла  $\theta = \frac{\sigma}{R}$ , и перенося неизвестные в левую часть, получим дифференциальные уравнения движения:

$$\begin{cases} \ddot{\sigma} = \omega^2 \left( r_0 + R\sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + \omega^2 \left( R - R\cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) - \frac{N_1}{m}f - \frac{N_2}{m}f; \\ \frac{N_1}{m} = \frac{\dot{\sigma}^2}{R} + \left( r_0 + R\sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) - \omega^2 \left( R - R\cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) \right) \cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + 2\omega\dot{\sigma}; \\ \frac{N_2}{m} = g; \end{cases} \quad (2.39)$$

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 C# в среде Microsoft Visual Studio.

В результате решения определены зависимости от времени  $\sigma(t), N_1(t)$ , а также величина абсолютной скорости  $v_a(t)$  массы  $m$ :

$$v_a = \sqrt{v_{ar}^2 + v_{a\varphi}^2}; \quad (2.40)$$

где  $v_{ar}$  – радиальная скорость центра масс, м/с;  $v_{a\varphi}$  – трансверсальная скорость центра масс, м/с.

$$v_{ar} = \dot{r} = \dot{\sigma} \cos(\theta); \quad (2.41)$$

$$v_{a\varphi} = \omega r + \dot{\sigma} \sin(\theta), \quad (2.42)$$

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

Полученные дифференциальные уравнения, учитывающие геометрию лопасти, центробежные и кориолисовы силы инерции, а также силы трения, представляют собой комплексный инструмент для исследования режимов работы измельчителя.

## 2.5.2 Лопасти, загнутые против направления вращения (выпуклые)

Представим лопасти той же кривизны, но вращающиеся в противоположную сторону. Схема сил, действующих на массу  $m$ , представлена на рисунке 2.5.

Спроектируем 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:

$$\begin{cases} m\ddot{\sigma} = \Phi_{e\tau} - F_1 - F_2; \\ m\frac{\dot{\sigma}^2}{R} = \Phi_{en} - N_1 + \Phi_C; \\ 0 = N_2 - mg. \end{cases} \quad (2.43)$$

Подставим величины сил в уравнения (2.43) и разделим на массу  $m$ , получим:

$$\begin{cases} \ddot{\sigma} = \omega^2(r_0 + R\sin(\theta))\cos(\theta) + \omega^2(R - R\cos(\theta))\sin(\theta) - \frac{N_1}{m}f - \frac{N_2}{m}f; \\ \frac{\dot{\sigma}^2}{R} = -\omega^2(r_0 + R\sin(\theta))\sin(\theta) + \omega^2(R - R\cos(\theta))\cos(\theta) - \frac{N_1}{m} + 2\omega\dot{\sigma}; \\ 0 = \frac{N_2}{m} - g. \end{cases} \quad (2.44)$$

Выразим неизвестные величины, перенеся их в левую часть уравнений, и с учетом того, что  $\theta = \frac{\sigma}{R}$ , получим:

$$\begin{cases} \ddot{\sigma} = \omega^2\left(r_0 + R\sin\left(\frac{\sigma}{R}\right)\right)\cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + \omega^2\left(R - R\cos\left(\frac{\sigma}{R}\right)\right)\sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) - \frac{N_1}{m}f - \frac{N_2}{m}f; \\ \frac{N_1}{m} = -\frac{\dot{\sigma}^2}{R} - \left(r_0 + R\sin\left(\frac{\sigma}{R}\right)\right)\sin\left(\frac{\sigma}{R}\right) + \omega^2\left(R - R\cos\left(\frac{\sigma}{R}\right)\right)\cos\left(\frac{\sigma}{R}\right) + 2\omega\dot{\sigma}; \\ \frac{N_2}{m} = g. \end{cases} \quad (2.45)$$

Добавим решение уравнений (2.45) в программу численного решения, как альтернативный вариант изгиба лопаток, при этом абсолютная скорость по выражению (2.40) имеет составляющие, равные

$$v_{ar} = \dot{r} = \dot{\sigma} \cos(\theta); \quad (2.46)$$

$$v_{a\varphi} = \omega r - \dot{\sigma} \sin(\theta). \quad (2.47)$$

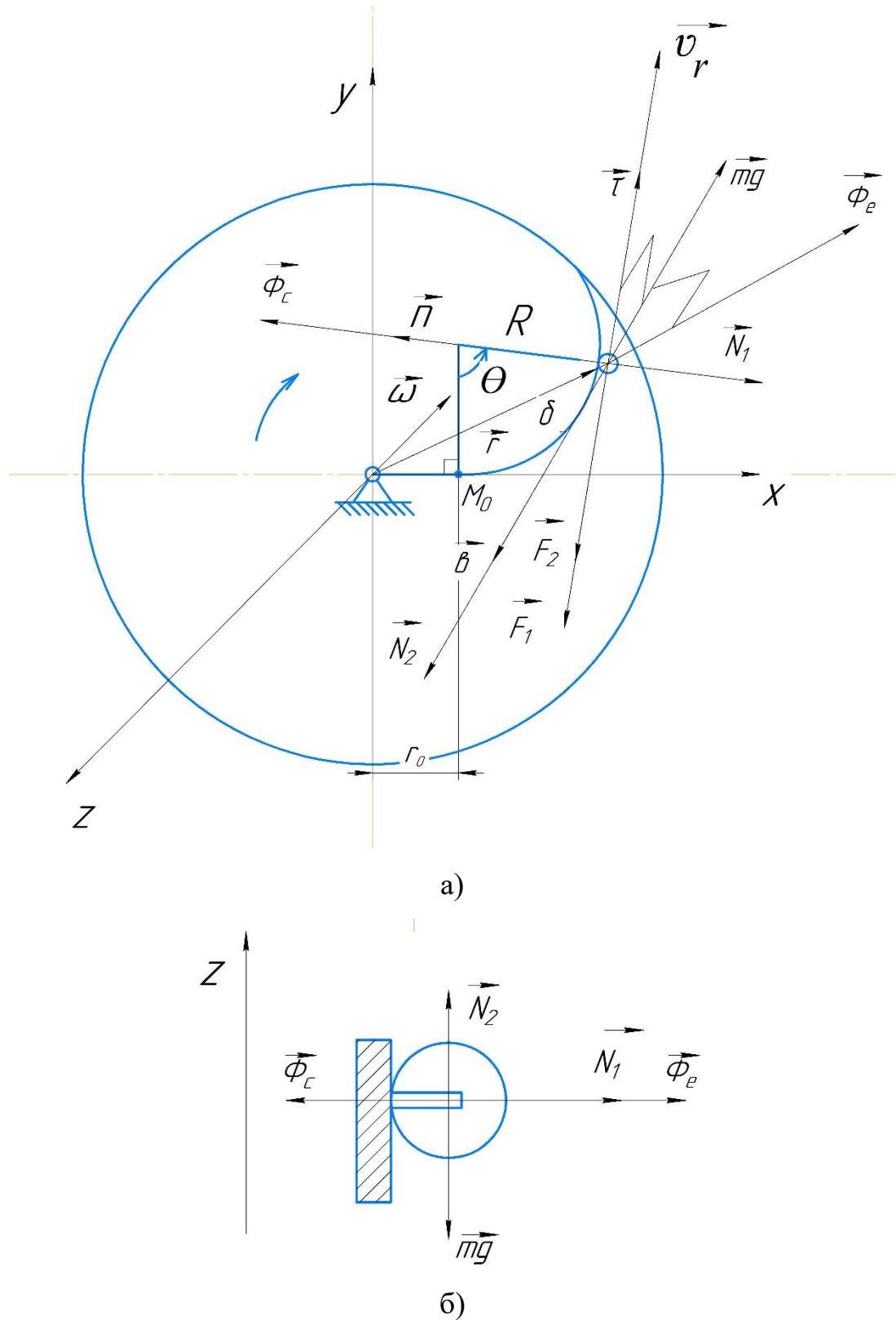


Рисунок 2.5 – Силы, действующие на массу измельченного корма в относительном движении при лопасти загнутой против направления вращения: а) вид сверху; б) в сечении вертикальной плоскостью, перпендикулярной касательной  $\vec{\tau}$

Знак минус у второго слагаемого в выражении (2.47) есть следствие тупого угла между относительной и переносной скоростями.

Экранная форма программы с таблицей численного решения дифференциальных уравнений (2.30) и (2.45) представлена в приложении А5.

Анализ динамики лопастей, загнутых против направления вращения, с использованием численного решения системы уравнений (2.45) предоставляет ценную информацию о поведении материала в процессе измельчения. Учет кориолисовой силы, нормальных реакций и геометрии лопасти позволяет получить более точное представление о распределении сил и скоростей. Полученные результаты, представленные в Приложении А, демонстрируют, что форма лопасти существенно влияет на динамику измельчения, что согласуется с теоретическими выкладками о влиянии геометрии рабочих органов на эффективность технологических процессов. Важным аспектом является учет знака минус во втором слагаемом выражения (2.47), отражающем геометрию взаимодействия относительной и переносной скоростей. Это подчеркивает необходимость точного описания кинематики движения материала для адекватного моделирования процесса.

Результаты моделирования, выполненного с шагом дискретизации  $\Delta t = 0.0001$  с, подтверждают чувствительность динамики к угловой скорости вращения. Эволюция формы лопасти при угловой скорости 156 рад/с демонстрирует нелинейный характер взаимодействия параметров, что указывает на необходимость проведения оптимизации конструкции с учетом конкретных условий эксплуатации, аналогично подходам, применяемым при проектировании центробежных устройств.

По результатам расчетов получены графические зависимости от времени перемещений, относительных и абсолютных скоростей, построенные в Microsoft Excel и представленные на рисунке 2.6, при следующих исходных данных: угловая скорость ротора  $\omega = 156 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , начальный радиус от оси

вращения  $r_0 = 0,018$  м, конечный радиус  $r_k = 0,165$  м, радиус кривизны лопасти  $R = 0,15$  м, коэффициент трения  $f = 0,3$ .

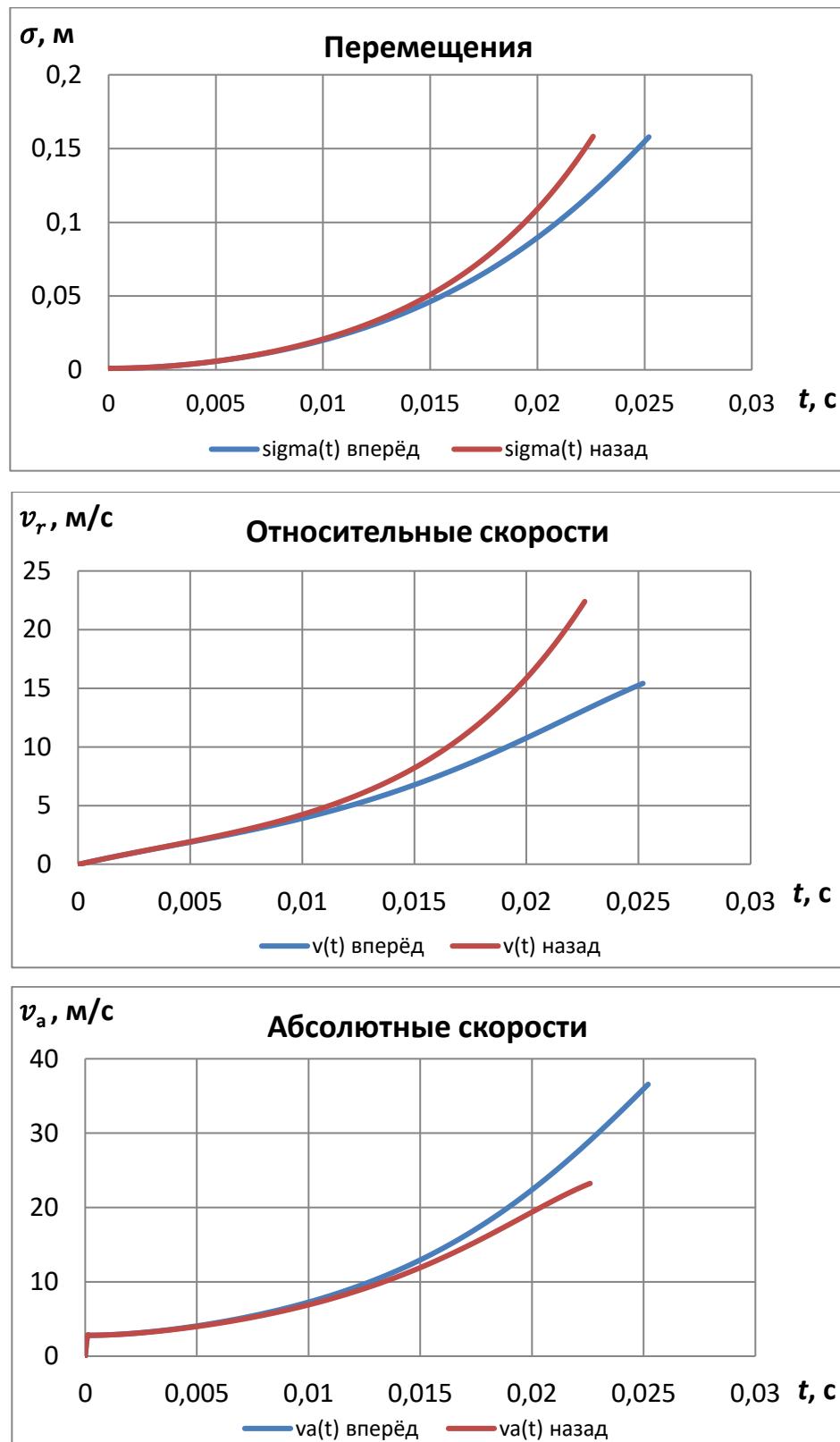


Рисунок 2.6 – Расчетные значения перемещений, относительных и абсолютных скоростей

На рисунке 2.7 представлены зависимости конечных значений абсолютной скорости, нормальной реакции и времени движения по лопасти.

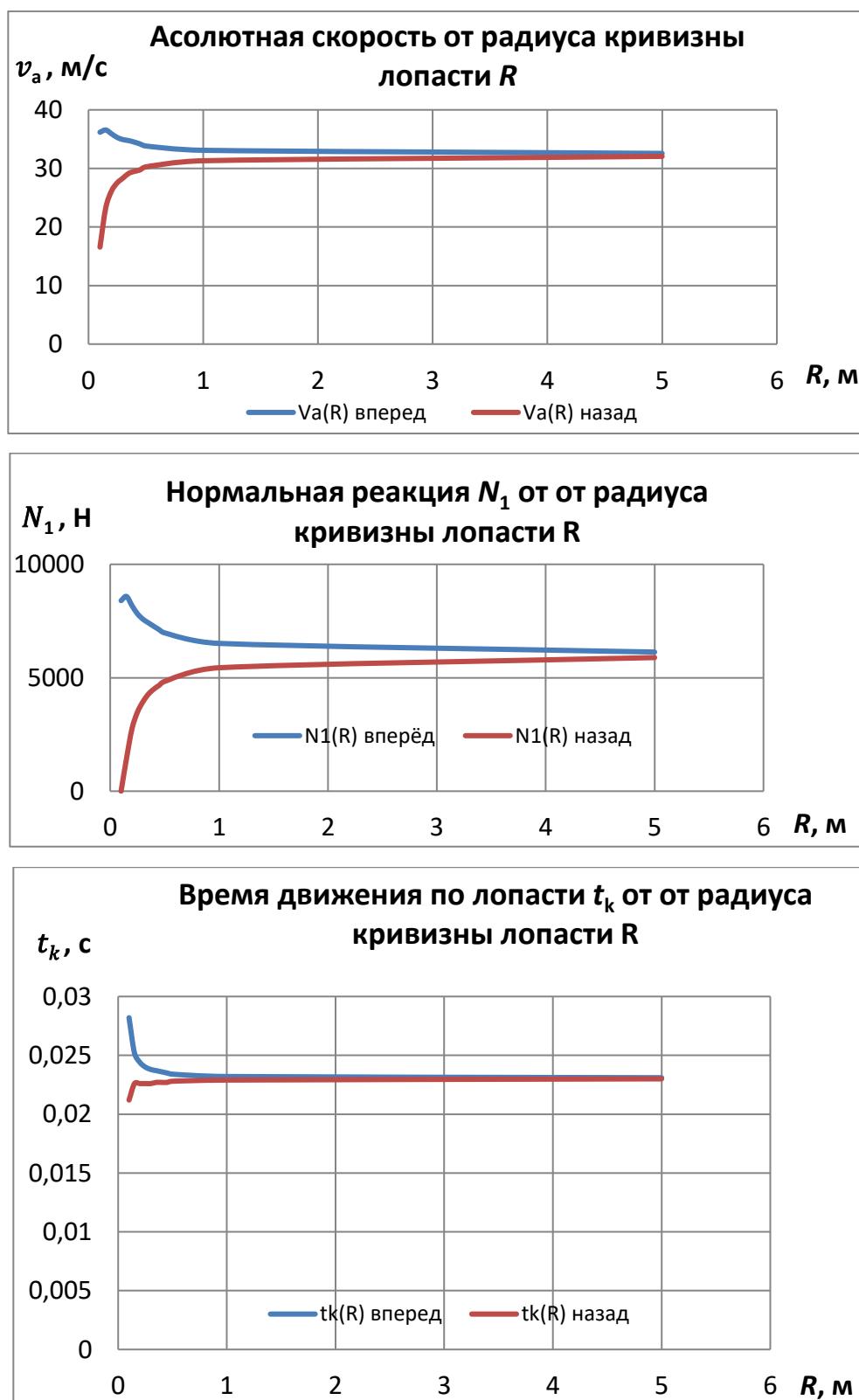


Рисунок 2.7 – Зависимости от радиуса кривизны лопасти конечных значений  $v_a(R)$ , нормальной реакции  $N_1(R)$  и времени движения по лопасти  $t_k(R)$

Отметим, что 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 изготовлении 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  $F_1$ . Полученные графические зависимости позволяют определить лучшие формы лопастей швырялки исходя из поставленных перед механизмом задач.

В результате проделанной работы:

1. Разработана и обоснована конструктивно-технологическая схема измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (патенты РФ № 2760435, № 2788535, № 230912). Ее ключевыми элементами, обеспечивающими энергоэффективность и высокое качество продукта, являются коническая форма рабочей камеры, обеспечивающая последовательное измельчение, ножи, расположенные с уменьшающимся шагом на 10 – 20 %, поворотные направляющие пластины с углом установки 0 – 90° для регулировки процесса и лопастная швырялка оригинальной формы для эффективной выгрузки.

2. Получены аналитические зависимости для определения пропускной способности, которая варьируется от 1,1 до 2,4 т/ч при изменении угловой скорости ротора в интервале  $\omega = 16,5 - 50 \text{ c}^{-1}$ , и степени измельчения. Расчетным путем установлено, что удельная мощность привода агрегата составляет от 1,15 до 6,9 кВт·ч/т. Проведенный силовой анализ процесса резания детально учитывает явление скользящего резания, геометрию режущего инструмента и свойства материала, показав зависимость снижения усилия резания от увеличения угла скольжения, при этом удельная линейная сила резания снижается на 50 – 60 % при увеличении угла скользящего резания.

3. Для практической реализации расчетов был разработан специализированный алгоритм и на его основе создана программа на языке C# в среде Visual Studio. Данный программный инструмент позволяет проводить численное моделирование и оценку влияния широкого спектра конструктивных и режимных параметров на итоговые показатели производительности и энергозатрат машины. Кроме того, было проведено теоретическое обоснование оптимальной формы лопасти швырялки выгрузной камеры; путем составления и численного решения дифференциальных уравнений движения материала для вогнутых (загнутой по направлению вращения) и выпуклых (загнутой против направления вращения) лопастей.

4. Теоретические исследования параметров выгрузной камеры показали, что для достижения максимальной абсолютной скорости материала на сходе с лопасти швырялки при  $\omega = 156 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $r_0 = 0,018 \text{ м}$ ,  $r_k = 0,165 \text{ м}$ ,  $f = 0,3$  необходимо выполнить её поверхность с загнутой по направлению вращения по радиусу  $R = 0,15 \text{ м}$ , располагая начальный участок радиально. Это обеспечит максимальный разгон материала на выходе из выгрузной камеры  $v_a = 36,56 \text{ м/с}$ .

5. В результате теоретического анализа процесса выгрузки измельченного материала из машины для обеспечения минимального времени пребывания материала на лопасти швырялки при  $\omega = 156 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $r_0 = 0,018 \text{ м}$ ,  $r_k = 0,165 \text{ м}$ ,  $f = 0,3$  следует выполнить лопасть загнутой против направлению вращения и радиусом кривизны  $R = 0,15 \text{ м}$ . При меньшем радиусе кривизны происходит отрыв материала от лопасти ( $N_1 = 0$ ) под действием центробежной силы и время движения с повторным попаданием на лопасть увеличивается. Эффект снижения времени пребывания на лопасти при изготовлении загнутой против вращения обусловлен уменьшением нормальной реакции  $N_1$  и связанной с ней силы трения  $F_1$ .

## Глава 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1 Общая программа экспериментальных исследований

Программа проведения лабораторных и лабораторно-производственных экспериментов предусматривала последовательность исследований, указанную на рисунке 3.1.

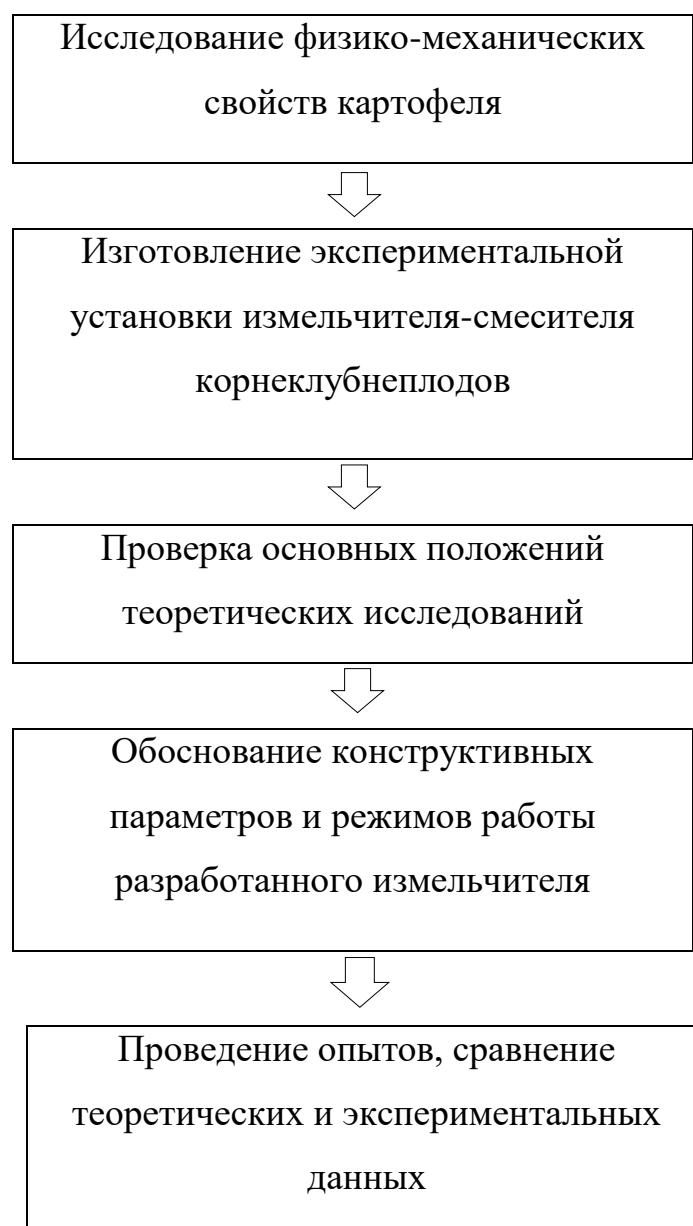


Рисунок 3.1 – Схема программы экспериментальных исследований

Данная последовательность включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка образцов клубней картофеля с различными параметрами, такими как влажность, масса и размер.
2. Настройка и подготовка измельчителя-смесителя к работе.
3. Проведение экспериментов с различными режимными параметрами, такими как частота вращения ротора, угол наклона направляющих, количество и форма ножей и т.д.
4. Измерение и анализ полученных результатов, таких как производительность измельчителя-смесителя, степень измельчения клубней картофеля, энергопотребление и другие.
5. Статистическая обработка данных и проведение сравнительного анализа полученных результатов.
6. Выводы и обсуждение полученных результатов, оценка эффективности использования разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

Такая последовательность экспериментальных исследований позволяет получить достоверные данные и сделать выводы о влиянии различных параметров на эффективность процесса измельчения корнеклубнеплодов.

### **3.2 Измерительные приборы и оборудование**

Проведение экспериментальных исследований осуществлялось в лабораторных и производственных условиях. При этом применялись как общепринятые методики исследований, так и специально разработанные частные методики, соответствующие поставленным задачам. Испытания проводились с использованием серийного и специально изготовленного оборудования, соответствующего требованиям действующих ГОСТ [53, 113-115, 117, 126], что обеспечило достоверность и воспроизводимость полученных экспериментальных данных. Особое внимание уделялось соблюдению метрологических характеристик измерительных приборов и

единству методов измерений на всех этапах эксперимента. Планирование экспериментальных исследований базировалось на применении общепризнанных методик организации многофакторного эксперимента [116]. Статистическая обработка полученных экспериментальных данных выполнялась с использованием аппарата математической статистики с применением специализированного программного обеспечения. Для первичной обработки и регрессионного анализа использовался пакет Microsoft Excel 2007, в то время как для реализации специализированных алгоритмов расчета и анализа данных применялось программное обеспечение, разработанное на языке C# в среде визуального программирования Visual Studio. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с ГОСТ Р 54783-2011 Испытания сельскохозяйственной техники [117]. Для определения перечня экспериментальных исследований использовалось необходимое оборудование, представленное в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Приборы и оборудование, применяемые при проведении экспериментальных исследований

Наименование	Фото/схема	ГОСТ	Назначение	Точность измерений
1	2	3	4	
Весы лабораторные ВК-600.1		ГОСТ 24104 - 2001	Определение массы	±0,02 г
Весы электронные навесные с крючком Universal Mart		ГОСТ 29329		±0,02 г

## Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
Штангенциркуль ШЩ-1		ГОСТ 166- 89	Для измерения размеров исходного материала и полученного корма	0,05 мм
Сушильный шкаф 2В-151		ТУ 64-1- 1411- 72	Метод определения содержание влаги	± 2,0 %
Секундомер TORRES Stopwatch SW-002		ГОСТ 5072- 79В	Определение времени	± 1,0 с
Установка для определения усилия резания		-	Усилие резания (статика)	-
Комбинированный тахометр МЕГЕОН 18003 00000001837		-	Для измерения количества оборотов в минуту	0,05 %

## Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
Бюксы алюминиевые		ГОСТ 27548 -97	Методы определения влаги	-
Чашка Петри		ГОСТ 25336 -82	Методы определения влаги	-
Марля техническая		ГОСТ 9412-2021	Определение потери сока	0,05 %
Набор гирь		ГОСТ 7328-2001	Методы определения усилие резания	$\pm 0,05$ мг
Измерительный комплект К50		ГОСТ 3741-73	Измерение силы тока, напряжения, активной и реактивной мощности	$\pm 0,5\%$
Частотный преобразователь		ГОСТ 24607-88	Управление скоростью вращения электродвигателей путем изменения частоты и напряжения питающего тока	0,05%

### Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4	5
Угломер электронный ELTECH 2210.001500		-	Для определения угла, при котором начинается скольжение объекта по наклонной плоскости	0,3° град.

Представленное экспериментальное оборудование позволяет осуществить исследование рабочих процессов и характеристик измельчителя-смесителя. Применение стандартизованных методик контроля в сочетании с современным измерительным оборудованием обеспечивает получение статистически достоверных результатов. Использование специализированного программного обеспечения для обработки экспериментальных данных гарантирует точность определения энергетических и технологических параметров работы агрегата, что создает надежную основу для обоснования его конструктивных и режимных характеристик.

### 3.3 Методика определения основных физико-механических характеристик

Проведенный анализ научной литературы показал, что исследованию размерно-массовых показателей и физико-механических свойств клубней картофеля посвящены работы ряда авторов. В существующих исследованиях [15, 23, 45] детально изучены такие параметры, как геометрические характеристики, плотность, твердость и упругопластические свойства клубней различных сортов. Полученные данные имеют существенное значение для проектирования технологического оборудования послеуборочной обработки, обеспечивающего сохранность продукции и минимизацию механических

повреждений. Особое внимание в работах [31, 52] уделено установлению корреляционных зависимостей между физико-механическими свойствами клубней и конструктивными параметрами рабочих органов картофелеуборочных машин и сортировальных комплексов [30, 118,]. Так, Ведищевым С.М. и Брусенковым А.В. [27, 119-121] исследованы некоторые физико-механические свойства клубней картофеля. Заводновым С.В. [122] внесен значительный вклад в оценку прочностных свойств клубней картофеля при ударных нагрузках о различные конструктивные поверхности сельскохозяйственных машин. Вопросами сортирования и ориентации клубней картофеля при калибровке занимались Алакин В.М. и Плахов С.А. [123-125].

Проведенные научные изыскания в области изучения физико-механических характеристик клубней картофеля, бесспорно, обладают существенной теоретической и практической ценностью для разработки сельскохозяйственной техники. Однако систематизация существующих данных выявляет их ориентацию преимущественно на конструкционные особенности серийно производимых измельчителей корнеклубнеплодов традиционной компоновки.

При проектировании перспективного измельчителя-смесителя кормов с многорядным расположением горизонтальных ножей на вертикальном валу возникает необходимость в исследованиях. Требуется уточнить комплекс физико-механических и технологических показателей клубней картофеля, включая: сопротивление срезу в динамическом режиме; реологические характеристики картофельной массы; адгезионные свойства свежесрезанных поверхностей; оптимизацию траекторий движения материала в рабочей камере.

Полученные экспериментальные данные позволят создать адекватную математическую модель процесса измельчения и обосновать рациональные параметры работы агрегата, обеспечивающие минимальное энергопотребление при заданном качестве кормовой смеси.

### 3.3.1 Методика определения влажности клубней

Определение влажности клубней картофеля является критически важным этапом в оценке их качества и пригодности для хранения, транспортировки и переработки. Влажность определяется в соответствии с ГОСТ 28561-90, который регламентирует методику определения влажности продуктов переработки плодов и овощей, где основное внимание уделяется точным и надежным методам измерения содержания влаги в этих продуктах [126].

Клубни картофеля нарезаются на ломтики толщиной 0,8 см. Подготовленный материал перемешивается с помощью стеклянной палочки (рисунок 3.2).



*Рисунок 3.2 – Приборы и материал для определения влажности*

В заранее взвешенные бюксы помещается экспериментальный материал (ломтики) с массой от 0,04 до 0,05 кг, который затем высушивается в сушильном шкафу (рисунок 3.3).

Для методики, предполагающей высушивание до достижения постоянной массы, абсолютное расхождение между параллельными

определениями не должно превышать 0,5 % при доверительной вероятности  $P = 0,95$  в случае одновременной сушки проб в одном сушильном шкафу. При проведении сушки в разное время или в различных лабораториях допустимое расхождение увеличивается до 1,0 % при сохранении той же доверительной вероятности.



*Рисунок 3.3 – Сушильный шкаф*

Для выбранной нами методики, основанной на высушивании в течение заданного времени при установленной температуре, установлены следующие нормативы: максимальное допустимое расхождение составляет 1,0 % ( $P = 0,95$ ) для проб, высушенных одновременно в одном сушильном шкафу [127]. Данные нормативы обеспечивают необходимую воспроизводимость результатов при варьировании условий проведения анализа.

Процесс сушки осуществляется в соответствии с инструкцией к сушильному шкафу при температуре  $115 \pm 5$  °С в течение 3 – 4 часов. После

чего ломтики высушиваются и охлаждаются около 20 мин в эксикаторе. Затем их взвешивают на лабораторных весах.

Массовую долю влаги в продукте ( $X$ ) в процентах вычисляют по формуле [126]:

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \cdot K \cdot 100, \quad (3.1)$$

где  $m_1$  – масса стаканчика с крышкой и пробой до высушивания, г;  $m_2$  – масса стаканчика с крышкой и пробой после высушивания, г;  $K$  – поправочный коэффициент;  $m_3$  – масса стаканчика с крышкой, г.

Массовую долю сухих веществ в продукте ( $X_1$ ) в процентах определяем по формуле:

$$X_1 = 100 - X.$$

Окончательный результат испытаний устанавливается на основе статистической обработки данных параллельных определений. В соответствии с регламентированной методикой, итоговое значение принимается как среднеарифметическое двух параллельных измерений, при этом устанавливаются строгие критерии приемлемости их расхождений.

### **3.3.2 Методика по определению коэффициента трения клубней картофеля**

При проектировании рабочих органов измельчающих машин необходимо знать физико-механические свойства клубней картофеля. Свойства клубней картофеля проявляются в процессе ее возделывания и в определенной степени зависят от культивируемых сортов, отличающихся по срокам созревания, форме клубней, урожайности и другим признакам.

При исследовании взаимодействия картофеля с различными поверхностями необходимо учитывать особенности видов внешнего трения, возникающих при перемещении клубней картофеля: трение скольжения; трение качения; трение опрокидывания.

Трение опрокидывания отличается от трения качения тем, что перемещение клубня под действием силы происходит вдоль большой оси (длины) клубня. Клубни картофеля имеют неопределенную форму и если поместить клубень на наклонную поверхность, то с увеличением угла ее наклона, клубни начинают перемещаться.

*Приборы и принадлежности:* лабораторная установка «наклонная плоскость», весы ВК-600.1, штангенциркуль, угломер электронный ELITECH 2210.001500.

*Порядок выполнения работы:* для определения сил и коэффициентов трения у клубней разных сортов на специальном приборе определяли величину углов трения качения, опрокидывания и скольжения (рисунок 3.4).



*Рисунок 3.4 – Прибор для определения углов трения клубней картофеля*

Прибор представляет собой площадку 1 с изменяемым углом её установки относительно горизонта. В качестве рабочей поверхности 2 площадки 1 прибора может быть применена пластина из различных материалов. Один край площадки шарнирно прикреплен к основанию 3 прибора, второй край снабжен подъемным механизмом 4.

Клубни картофеля взвесили, измерили габаритные размеры и распределили по группам, после этого картофель устанавливается на поверхность площадки прибора параллельно большой оси (длины) клубня к плоскости крепления подъемного механизма. Подъемным механизмом осуществляется плавный подъем одного края площадки, тем самым увеличивается угол между горизонтальной и рабочей поверхностью. Как только клубень начинает перемещение, подъем прекращается и поверхность фиксируется под определенным углом, который измеряется угломером и величина записывается в таблицу. После первого измерения каждый клубень поворачивают на  $180^\circ$  и вторично определяют угол трения ( $\alpha_{\text{пред}}$ ).

Выше описанным способом опыты проводили с картофелем, установленным на площадке перпендикулярно большой оси клубня к плоскости крепления подъемного механизма (для определения угла трения опрокидывания), а также, с разрезанными пополам клубнями (для определения угла трения скольжения).

После определения  $\alpha$  – угла наклона плоскости к горизонту, при котором клубень начинает перемещаться по плоскости, вычисляется коэффициент трения по формуле [128]:

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – угол трения (экспериментальная величина),  $^\circ\text{град.}$

Силу трения скольжения определяется по формуле [128]:

$$F_{\text{тр.ск}} = \mu mg \cos \alpha = mg \sin \alpha, \quad (3.3)$$

где  $F_{\text{тр.ск}}$  – сила трения скольжения,  $N$ ;  $N$  – сила реакции опоры, равная по модулю силе нормального давления и противоположно направленная,  $N$ ;  $m$  –

масса клубня, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для расчёта силы трения качения и опрокидывания применяется формула [128]:

$$F_{\text{тр.кач}} = \lambda N/R, \quad (3.4)$$

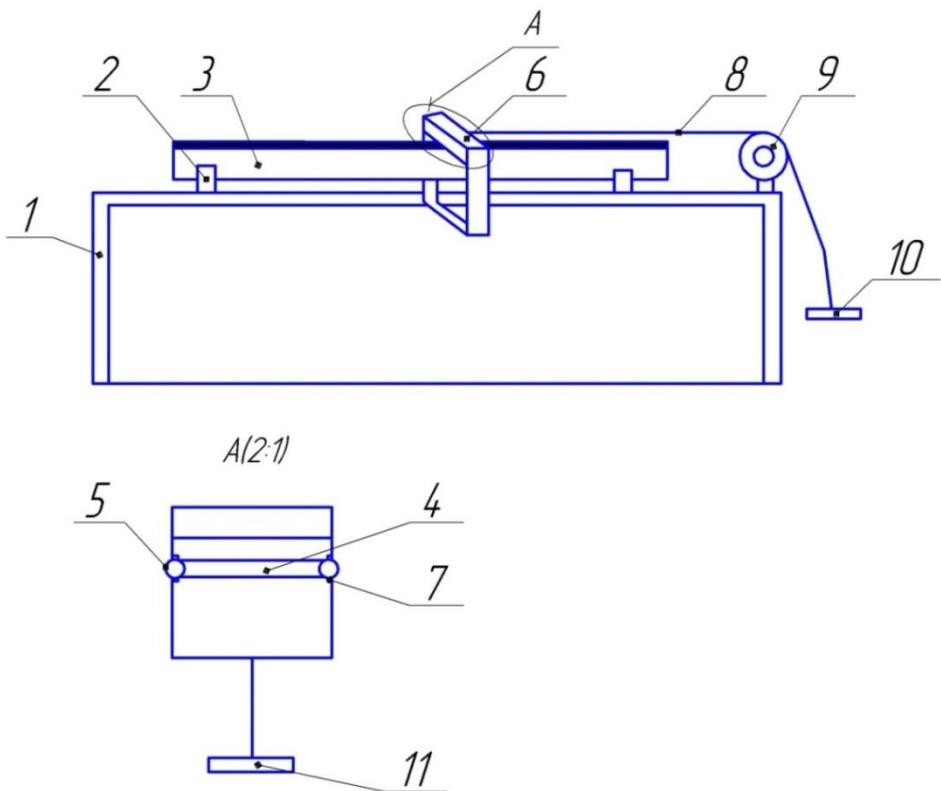
где  $F_{\text{тр.кач}}$  – сила трения качения, Н;  $\lambda$  – коэффициент трения качения,  $\text{м}/\text{Н}$ ;  $N$  – сила реакции опоры, Н;  $R$  – радиус клубня, м.

Результаты экспериментальных данных и вычислений заносятся в соответствующие таблицы.

### 3.3.3 Методика исследования параметров резания клубней картофеля

Для определения удельной работы резания клубней картофеля в исследованиях использовалась сконструированная и собранная на кафедре машин и оборудования Казанского ГАУ лабораторная установка. Установка по определению параметров резания клубней состоит из неподвижной рамы 1 (рисунок 3.5), в которой закреплён нож 3 при помощи зажимов 2. На лезвие ножа 3 устанавливается клубень картофеля 4, который закрепляется в держателе 7. Положение держателя на высоте регулируется винтом 5, находящегося в верхней части подвижной рамки 6. В нижней части рамки 6 устанавливаются грузы 11, которые необходимы для обеспечения нормального давления испытуемого материала. Для продольного перемещения подвижной рамки 6 имеется шнур 8, один конец которого закреплён в ушках подвижной рамки 6, а другой перекинут через ролик 9 и закреплён с динамометром 10, которым обеспечивается необходимое касательное усилие для среза со скольжением.

*Оборудование, приборы, материалы:* установка для проведения опытов, образцы клубней, штангенциркуль, набор лезвий, набор гирь, динамометр, весы.



*Рисунок 3.5 – Схема установки по определению параметров резания стеблей: рама – 1; зажим – 2; нож – 3; материал – 4; винт – 5; подвижная рамка – 6; держатель – 7; шнур – 8; ролик – 9; динамометр – 10; груз для нормального давления – 11*

*Порядок выполнения работы:* в начале эксперимента подготавливается испытуемый материал и измерительной оборудование. Устанавливается в зажимах 2 нож 3 горизонтально на высоту ролика 9 (рисунок 3.5). В подвижную рамку 6 фиксируется испытуемый материал (клубень картофеля) 4. Подбирается масса груза 11 для нормального давления. При помощи динамометра 10 создается усилие  $P$  (величину записываем), достаточное для сдвига клубня, при котором происходит резание. Измеряется длина  $L$  перемещения клубня при резании.

Вычисляется площадь поперечного сечения прорезанного клубня по формуле для определения сегмента круга [129]:

$$S = \frac{R^2}{2} \left( 2 \cdot \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)\right) \right), \quad (3.5)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения сегмента прорезанного клубня,  $\text{мм}^2$ ;  $R$  – радиус клубня,  $\text{мм}$ ;  $h$  – высота прорезанного сегмента,  $\text{мм}$ .

Удельная работа резания представляет собой энергетическую характеристику процесса разрушения материала, определяемую как количество работы, затрачиваемое на единицу площади среза. Данный показатель рассчитывается по следующей формуле [130-133]:

$$A_{y\delta} = \frac{A}{S} = \frac{PL}{S}, \quad (3.6)$$

где  $A$  – общая величина произведённой при резании работы,  $\text{Дж}$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения перерезанного материала,  $\text{м}^2$ ;  $P$  – рабочее сопротивление при резании,  $\text{Н}$ ;  $L$  – длина перемещения клубня при резании,  $\text{м}$ .

Результаты проведенных исследований приведены в главе 4 диссертации в виде таблиц и графика.

### **3.4 Методика исследования влияния режимов работы измельчителя-смесителя на показатели технологической эффективности процесса**

Для проведения исследований процесса получения измельченного корма, соответствующего зоотехническим требованиям, в измельчитель-смесителе корнеклубнеплодов, согласно известных методик на основании работ В. Р. Алешкина, Б. Г. Зиганшина, И.Е. Волкова, Е. И. Резника [17, 18, 22, 71, 86, 106, 110] и других авторов, была разработана и создана экспериментальная установка. Лабораторно-производственная установка предназначена для исследования процесса измельчения кормов с целью определения влияния конструктивно-технологических и кинематических параметров на энергетические и качественные показатели работы измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

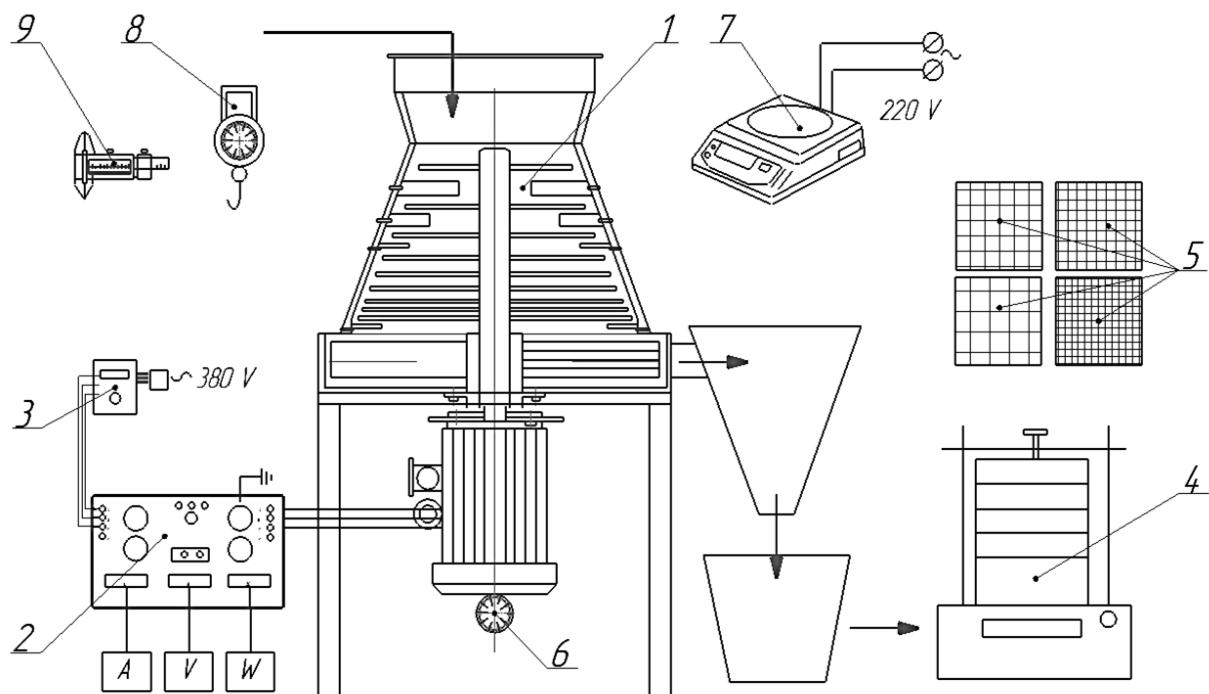
Задачами исследований является определение:

- энергоемкости процесса измельчения при установившихся режимах работы измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов;

- однородности измельченного корма и процентного содержания частиц, соответствующих зоотехническим требованиям;

- потери сока при различных режимах работы измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

Установка (рисунки 3.6 и 3.7) состоит из измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов 1, переносного измерительного комплекта К-50 2, частотного преобразователя 3, ситового классификатора 4 со сменными решетами 5, комбинированного тахометра МЕГЕОН 6, весов лабораторных ВК-600.1 7 и весов электронных Universal Mart 8. Для измерения исходного размера клубней используется штангенциркуль ШЦ 9.



*Рисунок 3.6 – Схема лабораторно-производственной установки: измельчитель-смеситель кормов – 1; переносной измерительный комплект К-50 – 2; частотный преобразователь – 3; классификатор решетный – 4; решета сменные – 5; комбинированный тахометр МЕГЕОН – 6; весы лабораторные ВК-600.1 – 7; весы электронные Universal Mart – 8; штангенциркуль – 9*



*Рисунок 3.7 – Общий вид лабораторно-производственной установки*

Объектом исследований являлся процесс измельчения клубней картофеля в различных режимах работы. На кинематику и энергетику процесса резания одновременно влияют взаимосвязанные факторы, образующие сложную систему: физико-механические характеристики сырья (влажность, прочность, реологические свойства) и конструктивно-режимные параметры рабочего органа (геометрия кромки, угол атаки, скорость взаимодействия).

Эффективность процесса определяется согласованностью этих параметров, что в конечном итоге определяет удельную энергоемкость и качество продукта [42]. Можно выделить следующие входные факторы, влияющие на процесс работы измельчители-смесителя (таблица 3.2).

Диаметры горловин приемного бункера и камеры измельчения необходимо выбирать из условия беспрепятственного движения материала к рабочим органам под действием силы тяжести без образования сводов с учетом массово-размерных характеристик клубней и свойств разрезанных кусочков. Согласно рекомендациям [52, 115], диаметр приемного бункера следует устанавливать в диапазоне от 0,35 до 0,40 м.

Таблица 3.2 – Наименование факторов и уровни их варьирования

Натуральное обозначение	Наименование факторов	Условное обозначение	Уровни варьирования	
			нижний	верхний
X <sub>0</sub>	размеры корнеклубнеплодов перед измельчением, м	d <sub>к</sub>	0,02	0,1
X <sub>1</sub>	диаметр горловины приемного бункера, м	D <sub>Б</sub>	0,35	0,4
X <sub>2</sub>	угол наклона стенок приемного бункера, град;	α <sub>б</sub>	30	70
X <sub>3</sub>	диаметр горловины камеры измельчения, м	D <sub>КИ</sub>	0,15	0,35
X <sub>4</sub>	диаметр вала ротора измельчителя, м	d <sub>в</sub>	0,032	0,05
X <sub>5</sub>	длина ножей 1 ряда, м	l <sub>1Н</sub>	0,06	0,12
X <sub>6</sub>	зазор между ножами и корпусом камеры измельчения, м	θ <sub>Н</sub>	0,001	0,005
X <sub>7</sub>	количество ножей в каждом ряду, шт.	Z <sub>Н</sub>	1	3
X <sub>8</sub>	толщина лезвия ножей, м	t <sub>Н</sub>	0,001	0,005
X <sub>9</sub>	ширина лезвия ножей, м	b <sub>Н</sub>	0,02	0,05
X <sub>10</sub>	угол заточки лезвия ножей, град.	β <sub>Н</sub>	30	45
X <sub>11</sub>	острота лезвия ножей, м	δ <sub>Н</sub>	0,003	0,007
X <sub>12</sub>	угол 1-ряда направляющих пластин, град.	γ <sub>1НП</sub>	0	90
X <sub>13</sub>	длина 1-ряда направляющих пластин, м	l <sub>1НП</sub>	0,05	0,1
X <sub>14</sub>	количество направляющих пластин в ряду, шт.	Z <sub>1НП</sub>	1	3
X <sub>15</sub>	расстояние между 1 и 2 рядами ножей, м	h <sub>12</sub>	0,01	0,05
X <sub>16</sub>	длина ножей 2 ряда, м	l <sub>2Н</sub>	0,06	0,12
X <sub>17</sub>	расстояние между 2 и 3 рядами ножей, м	h <sub>23</sub>	0,001	0,005
X <sub>18</sub>	угол 2-ряда направляющих пластин, град.	γ <sub>2НП</sub>	0	90
X <sub>19</sub>	длина 2-ряда направляющих пластин, м	l <sub>2НП</sub>	0,05	0,1
X <sub>20</sub>	количество направляющих пластин во 2 ряду, шт.	Z <sub>2НП</sub>	1	3
X <sub>21</sub>	длина ножей 3 ряда, м	l <sub>3Н</sub>	0,06	0,12
X <sub>22</sub>	расстояние между 3 и 4 рядами ножей, м	h <sub>34</sub>	0,001	0,005
X <sub>23</sub>	длина противорезов 1 ряда, м	l <sub>1П</sub>	0,03	0,06
X <sub>24</sub>	толщина противорезов, м	t <sub>П</sub>	0,001	0,005
X <sub>25</sub>	ширина противорезов, м	b <sub>П</sub>	0,01	0,05
X <sub>26</sub>	количество противорезов в ряду, шт.	Z <sub>П</sub>	1	3

## Продолжение таблицы 3.2

$X_{27}$	угол заточки противорезов, град.	$\beta_\Pi$	30	45
$X_{28}$	зазор между ножами и противорезами, м	$\theta_\Pi$	0,02	0,05
$X_{29}$	длина ножей 4 ряда, м	$l_{4H}$	0,06	0,12
$X_{30}$	расстояние между 4 и 5 рядами ножей, м	$h_{45}$	0,001	0,005
$X_{31}$	длина ножей 5 ряда, м	$l_{5H}$	0,06	0,12
$X_{32}$	расстояние между 5 и 6 рядами ножей, м	$h_{56}$	0,001	0,005
$X_{33}$	длина ножей 6 ряда, м	$l_{6H}$	0,06	0,12
$X_{34}$	расстояние между 6 и 7 рядами ножей, м	$h_{67}$	0,001	0,005
$X_{35}$	длина противорезов 2 ряда, м	$l_{1\Pi}$	0,03	0,06
$X_{36}$	длина ножей 7 ряда, м	$l_{7H}$	0,06	0,12
$X_{37}$	расстояние между 7 и 8 рядами ножей, м	$h_{78}$	0,001	0,005
$X_{38}$	частота вращения ротора измельчителя, $s^{-1}$	$n_p$	12,5 (750)	25 (1500)
$X_{39}$	скорость резания ножей, м/с	$v_H$	4	12
$X_{40}$	диаметр основания камеры измельчения, м	$D_O$		
$X_{41}$	форма лопасти швырялки выгрузной камеры		по направлению	против вращения
$X_{42}$	радиус кривизны лопасти швырялки, м	$R_{ЛШ}$	0,1	0,2
$X_{43}$	ширина лопасти швырялки, м	$b_{ЛШ}$	0,05	0,1
$X_{44}$	зазор между лопастью швырялки и корпусом выгрузной камеры, м	$\theta_{ЛШ}$	0,001	0,005
$X_{45}$	количество лопастей швырялки, шт.	$Z_{ЛШ}$	1	3
$X_{46}$	время измельчения, с	$t$	5	20
$X_{47}$	размерно-массовые характеристики клубней (длина, диаметр, плотность)	-	-	-
$X_{48}$	технологические свойства клубней (влажность, коэффициенты трения, усилия резания)	-	-	-

На основе анализа теоретических исследований ряда ученых можно сделать следующие выводы:

- длина ножей и зазор между ними и корпусом определяются геометрическими параметрами камеры измельчения;

- значения толщины ножей, противорезов, направляющих пластин, лопастей швырялки и диаметр вала ротора определяются с учетом прочностных характеристик материала изготовления [111, 114, 117];
- количество ножей и расстояние между рядами ножей зависят от конструктивных параметров камеры измельчения и определяются зоотехническими требованиями к размерам фракций измельченного корма. В соответствии с проведенными исследованиями [15, 26, 109], минимальное расстояние между рядами ножей принимаем на уровне 0,12 м;
- для поддержания необходимой остроты лезвий, влияющее на энергоемкость процесса измельчения, требуется периодическая заточка ножей [7, 18, 48, 78, 107, 108]; также, для уменьшения энергозатрат работы измельчителя-смесителя, необходимо стремиться к минимальным значениям углов заточки лезвий ножей и противорезов [23, 101, 132]. В процессе измельчения рассмотренные факторы не являются управляемыми;
- физико-механические свойства перерабатываемого материала, такие как влажность, плотность и прочность, являются объективными характеристиками сырья и не подлежат оперативному регулированию в процессе эксплуатации оборудования. Эти параметры требуют учета на стадии проектирования рабочих органов установки [120, 121, 122];
- конструктивные параметры лопастного метательного устройства, включая радиус кривизны и пространственную ориентацию лопастей, находятся в прямой функциональной зависимости от геометрии выгрузной камеры, проектные характеристики которой определяются пропускной способностью камеры измельчения. Форма лопастей оптимизируется для обеспечения эффективной транспортировки и сепарации измельченного материала в ограниченном объеме выгрузного модуля, что позволяет достичь максимального коэффициента полезного действия при минимальном энергопотреблении и исключении зон застоя продукта.

Анализ данных научных исследований позволяет утверждать, что скорость резания представляет собой ключевой параметр, характеризующий

эффективность процесса измельчения клубнеплодов. Данный показатель является функцией частоты вращения рабочего органа и радиуса расположения режущих кромок, при этом экспериментально обоснованный диапазон 4-12 м/с обеспечивает оптимальное соотношение между качеством измельчения и энергозатратами. Указанные значения способствуют формированию заданного гранулометрического состава продукта при минимальном повреждении клеточной структуры материала, что подтверждается результатами исследований [27-30].

Сводные данные, характеризующие эффективность технологического процесса приготовления кормов, систематизированы в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Выходные параметры, характеризующие процесс измельчения

Натуральное обозначение	Наименование параметра	Единица измерения	Условное обозначение	Диапазон значений	Примечания
$y_1$	производительность	кг/с	$Q_{изм}$	1,1-2,4	Зависит от типа корма и режима работы
$y_2$	потребляемая мощность	Вт	$N$	1,5-5,0	Зависит от нагрузки и производительности
$y_3$	удельный расход энергии	Вт с/кг	$N_{уд}$	1,36-2,08	Рассчитывается по формуле
$y_4$	фракционный состав	%	$\Phi_K$	85-92	Доля частиц целевой фракции 10-20 мм
$y_5$	средний взвешенный размер полученных частиц	м	$b_{ср}$	10-20	Соответствует зоотехническим требованиям
$y_6$	критерий однородности	%	$K_{од}$	85-95	Зависит от времени смешивания
$y_7$	потери сока	%	$P_C$	3-8	Определяется влажностью сырья и режимом измельчения

Представленные параметры включают производительность агрегата, удельные энергозатраты, гранулометрический состав готового продукта и другие технологические показатели, позволяющие провести комплексную

оценку работы измельчителя-смесителя в различных режимах эксплуатации. Особое внимание стоит уделить удельному расходу энергии, критерию однородности и потерям сока. Эти параметры напрямую влияют на экономичность и качество конечного продукта. Оптимизация этих показателей позволит не только снизить затраты, но и обеспечить стабильность характеристик измельченного материала.

На основании литературных источников, анализа всех факторов, влияющих на процесс работы измельчителя-смесителя, и предварительных экспериментальных исследований, выбраны следующие управляемые факторы для проведения экспериментов (таблица 3.4):

- количество ножей;
- частота вращения ротора;
- направление лопасти швырялки выгрузной камеры.

Для экспериментальных исследований использовалась методика планирования эксперимента. Опыты проводились в трехкратной повторности с проведением рандомизации.

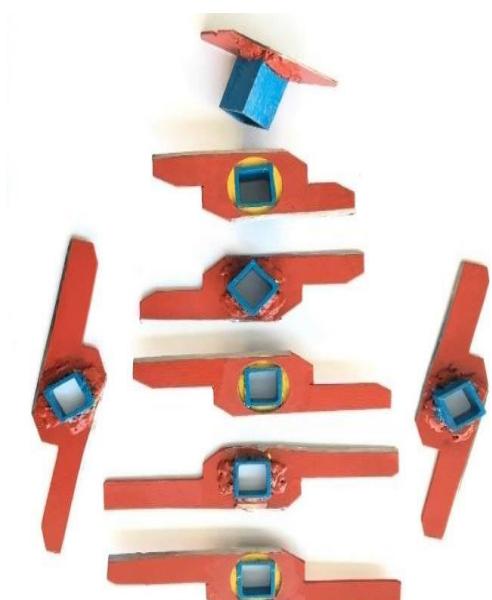
Таблица 3.4 – Уровни варьирования факторов

Номер опыта	Матрица планирования						
	Факторы, $X_j$			Взаимодействующие факторы			Функция отклика
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	
1	-	-	-	+	+	+	$Y_1$
2	+	-	-	-	-	+	$Y_2$
3	-	+	-	-	+	-	$Y_3$
4	+	+	-	+	-	-	$Y_4$
5	-	-	+	+	-	-	$Y_5$
6	+	-	+	-	+	-	$Y_6$
7	-	+	+	-	-	+	$Y_7$
8	+	+	+	+	+	+	$Y_8$

Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбец произведения двух факторов. При вычислении

коэффициента, соответствующего эффекту взаимодействия, с новым вектор-столбцом можно обращаться так же, как с вектор-столбцом любого фактора. Очень важно, что при добавлении столбцов эффектов взаимодействий все рассмотренные свойства матриц планирования сохраняются [134].

Для выполнения экспериментов были изготовлены сменные рабочие органы для лабораторно-производственной установки (рисунки 3.8 -3.11).

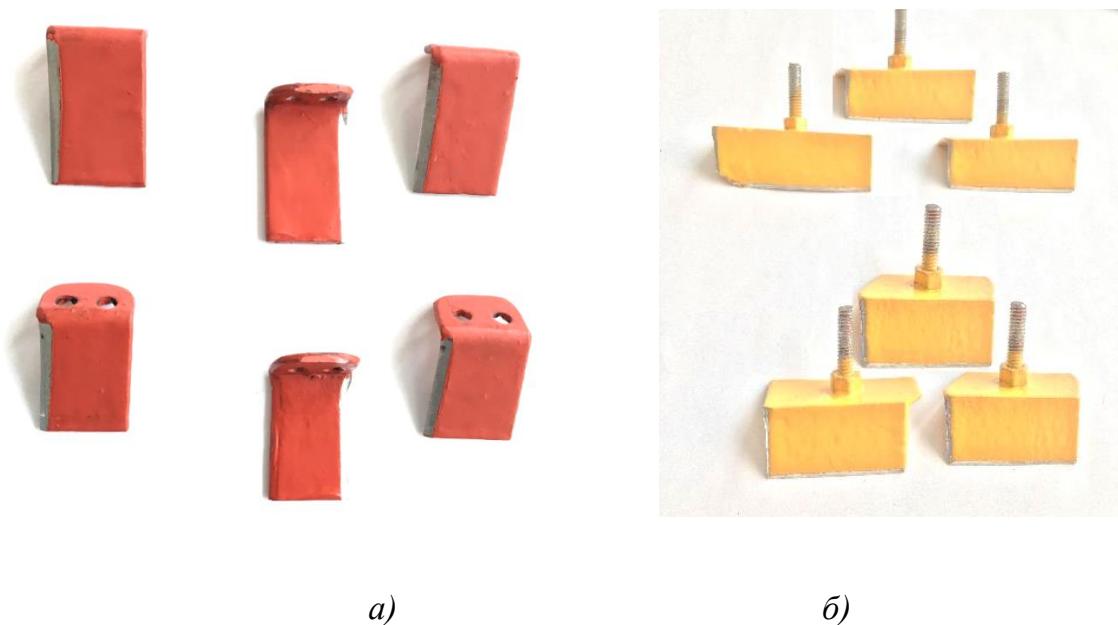


*Рисунок 3.8 – Ротор в сборе и измельчающие ножи*

Конструкция измельчающего ротора (рисунок 3.8) включает вертикальный вал с возможностью установки до девяти горизонтальных ножей. Ножи изготовлены из высокопрочной стали и имеют прогрессивную длину от 140 до 304 мм. Особенностью конструкции является постепенное увеличение длины ножей по направлению к нижней части рабочей камеры при одновременном уменьшении межрядного расстояния, что обеспечивает оптимизацию процесса многоступенчатого измельчения.

Противорежущие элементы (рисунок 3.9а) установлены в два ряда по три элемента в каждом ряду. Геометрические параметры противоножей включают толщину 3 мм при ширине 30 мм. Длина трех элементов составляет

45 мм, остальных трех – 55 мм, что создает дифференцированную зону резания. Направляющие пластины (рисунок 3.9б) выполнены из алюминиевого сплава и установлены в два ряда по три пластины в ряду. Ширина пластин составляет 22 мм при длине 50 мм для трех элементов и 70 мм для остальных трех. Такая конфигурация обеспечивает оптимальное направление потока измельчаемого материала и минимизацию зон застоя.

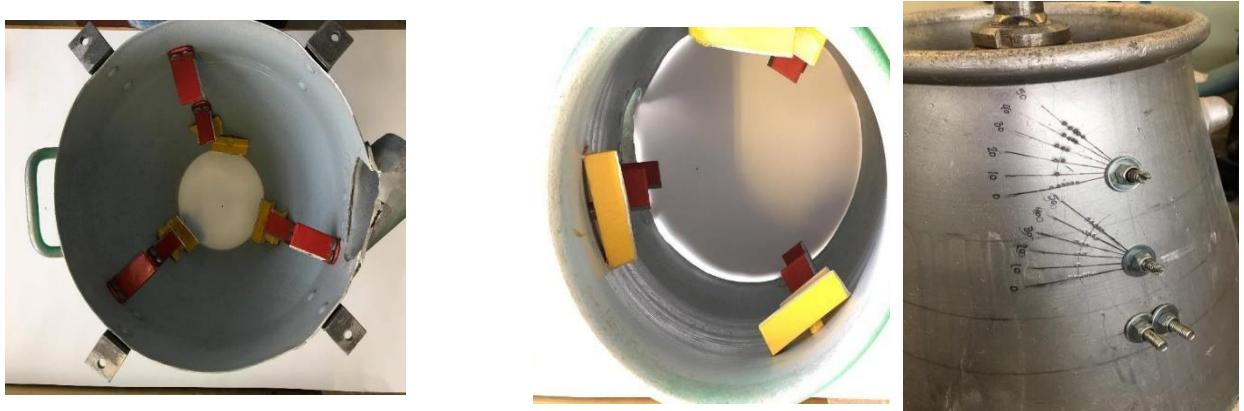


*Рисунок 3.9 – Противорежущие ножи а) и направляющие пластины б)*

Конструкция измельчителя-смесителя предусматривает возможность регулировки технологического процесса посредством изменения положения направляющих пластин. Поворотные направляющие пластины могут фиксироваться в диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $50^\circ$  относительно направления потока материала. Увеличение угла установки до максимального значения  $50^\circ$  создает условия для продления времени пребывания материала в рабочей зоне, что обеспечивает более интенсивное измельчение и уменьшение фракционного состава продукта.

На рисунке 3.10 представлена компоновка направляющих пластин и противорежущих ножей внутри рабочей камеры, где визуализированы различные варианты их пространственного расположения. На внешней стенке

корпуса нанесена градуировочная шкала, позволяющая точно устанавливать требуемый угол положения направляющих элементов в процессе эксплуатации оборудования. Данная конструктивная особенность обеспечивает гибкость в управлении технологическими параметрами работы измельчителя-смесителя.



*Рисунок 3.10 – Расположение направляющих пластин и противорезов*

По теоретическим расчетам были изготовлены швырятки с направлением лопастей по и против направления вращения (рисунок 3.11).



*Рисунок 3.11 – Швырятки выгрузной камеры*

Для определения частоты вращения использовали оптоэлектронное устройство МЕГЕОН 18003 (рисунок 3.12). Для включения прибора необходимо кратковременно нажать кнопку «измерение». На ЖК-дисплее в течение одной секунды отображаются все символы, а затем показывался текущий результат измерения скорости.

Для измерения скорости вращения контактным методом выбирается «режим» грт (об/мин) установив соответствующий адаптер (малый конус – для высокой частоты вращения). Далее нажимаем на кнопку измерения и

прижимаем наконечник резиновой частью к оси вращающегося объекта. Когда на дисплее показания стабилизируются, нажимаем кнопку «память». Максимальное, минимальное, среднее и текущее значение результатов измерений автоматически сохраняются в памяти.



*Рисунок 3.12 – Определение частоты вращения ротора*

Исследование сфокусировано на трех основных факторах, влияющих на процесс измельчения: частота вращения ротора, количество ножей, формы лопасти швырялки. Каждый из этих факторов имеет важное значение для достижения оптимального процесса измельчения и минимизации потерь. В качестве выходных параметров, оценивающих экономичность и качество конечного продукта приняты удельный расход энергии, однородность измельченного корма и потери сока. Таким образом, исследование позволяет

оптимизировать процесс измельчения, чтобы минимизировать потери и улучшить технологические и экономические показатели производства кормов.

### 3.5 Методика определения удельного расхода энергии

Эксперимент проводится в следующей последовательности. Включается система подключением питания 380 В, устанавливаются необходимые конструктивные и технологические параметры, в бункер засыпается заранее взвешенная навеска, засекается время, за которое происходит измельчение клубней и отношением массы ко времени подсчитывается пропускная способность измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов.

С целью определения энергоемкости процесса измельчения во время проведения опытов для изменения частоты вращения ротора использовали частотный преобразователь и с помощью переносного измерительного комплекта типа К-50 (рисунок 3.13).



*Рисунок 3.13 – Определение электрических и энергетических показателей экспериментальной установки с помощью переносного измерительного комплекта типа К-50*

После запуска электродвигателя фиксировали по приборам измерительного комплекта следующие показатели: напряжение, силу тока и мощность холостого хода. Также фиксировали силу тока и мощность на привод измельчителя-смесителя при установленном режиме работы.

При подключении прибора К 50 переключатель фаз устанавливается в промежуточном положении, переключатель «V» – на пределе 450 V, переключатель полярности ваттметра должен указывать «+».

При использовании измерительного комплекта К-50 совместно с частотным преобразователем необходимо переключатель «A» установить в положение 5А. Согласно инструкции измерительного комплекта К-50 для определения линейного напряжения показатели фазного напряжения  $U_\phi$  с вольтметра умножаются на «3», действительная сила тока вычисляется умножением показателя амперметра на «0,05», общая мощность определяется как сумма показаний ваттметра в 3<sup>x</sup> фазах умноженная на «15».

Общая измеряемая мощность  $W_\Sigma$  равна сумме показаний ваттметра в 3<sup>x</sup> фазах определяется по формуле:

$$W_\Sigma = (W_A + W_B + W_C) \cdot 15, \quad (3.7)$$

где  $W_A, W_B, W_C$  – мощности, измеренные в фазах А, В, С.

При всех подключениях вольтметр показывает фазное напряжение  $U_\phi$ . Линейное напряжение  $U_\pi$  находим по формуле:

$$U_\pi = (U_\phi \cdot 3) \cdot \sqrt{3}. \quad (3.8)$$

Действительная сила тока вычисляется по выражению:

$$I = I_\Pi \cdot 0,05, \quad (3.9)$$

где  $I$  – сила тока, потребляемая электродвигателем, А;  $I_\Pi$  – сила тока по амперметру К-50, А.

Коэффициент мощности определяется по следующей формуле:

$$\cos \varphi = \frac{W_A W_B W_C}{3 \cdot I \cdot U_\phi}. \quad (3.10)$$

Удельная энергоёмкость технологического процесса измельчения-смешивания представляет собой ключевой показатель энергетической

эффективности работы агрегата и определяется как отношение мощности привода к производительности измельчителя-смесителя [100]:

$$E_{уд} = W_{\Sigma}/Q, \quad (3.11)$$

где  $W_{\Sigma}$  – мощность, подводимая к ротору измельчителя-смесителя, Вт;  $Q$  – пропускная способность измельчителя-смесителя, кг/с.

### 3.6 Методика определения степени измельчения и неоднородности измельченного корма

Одним из критериев оценки эффективности измельчения является степень измельчения – отношение среднего размера исходного материала к среднему размеру частиц измельчённого продукта.

Для достижения высокой точности результатов эксперимента, необходимо тщательно подготовить исходный материал и соответствующим образом настроить оборудование. Подготовка начинается с очистки клубней, что включает в себя удаление грязи, песка и других загрязнений, которые могут повлиять на качество измельчения и привести к повреждению оборудования. После этого клубни промываются под струей воды, что обеспечивает дополнительное удаление остатков загрязнений. На этом этапе важно также провести взвешивание клубней, чтобы получить исходные данные о массе материала, который будет подвергаться обработке (рисунок 3.14).



*Рисунок 3.14 – Определение геометрических параметров клубней*

Следующим шагом является сортировка клубней по размеру, что позволяет разделить их на фракции (рисунок 3.16), подходящие для дальнейшего измельчения. Процесс сортировки выполняется вручную, обеспечивая необходимую однородность исходного материала.



*Рисунок 3.15 – Разделение клубней картофеля по фракциям*

Далее взвешиваются навески клубней картофеля (рисунок 3.16).



*Рисунок 3.16 – Взвешивание клубней картофеля перед измельчением*

После подготовки исходного материала необходимо подготовить оборудование. Важно установить измельчитель-смеситель на ровной поверхности и проверить его работоспособность. Настройка включает в себя выбор необходимого количества ножей, что может варьироваться от трех до девяти в зависимости от требуемой степени измельчения. Включается питание измельчителя-смесителя, подается подготовленная порция клубней и происходит их измельчение.

После измельчения выполняется взвешивание полученного корма и разделение по фракциям с помощью ситового классификатора (рисунок 3.17). Фракции имели следующие размерности (мм): до 5; от 5,1 до 10; от 10,1 до 15; от 15,1 до 20; свыше 20.



*Рисунок 3.17 – Ситовой классификатор*

Каждую фракцию взвешивали отдельно на весах ВК-600.1 с точностью до 0,01 г. Подсчитывали их процентное соотношение по массе.

Степень измельчения материала определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{d_{\text{исх.ср}}}{l_{\text{изм.ср}}}, \quad (3.12)$$

где  $\lambda$  – степень измельчения;  $d_{\text{исх.ср}}$  – средневзвешенный размер исходного материала;  $l_{\text{изм.ср}}$  – средневзвешенный размер измельченных частиц.

Средние геометрические параметры каждой фракции и числовое значение средневзвешенного размера исходных клубней определяется по следующей формуле:

$$d_{\text{исх.ср}} = \frac{d_1 \cdot m_{\text{k1}} + d_2 \cdot m_{\text{k2}} + d_3 \cdot m_{\text{k3}}}{m_{\text{k1}} + m_{\text{k2}} + m_{\text{k3}}}, \quad (3.13)$$

где  $d_{\text{исх.ср}}$  – средневзвешенный размер клубней картофеля, мм;  $d_1$  – размер клубней 1-ой фракции, мм;  $d_2$  – размер клубней 2-ой фракции, мм;  $d_3$  – размер клубней 3-ой фракции, мм;  $m_{\text{k1}}$  – масса клубней 1-ой фракции, г;  $m_{\text{k2}}$  – масса клубней 2-ой фракции, г;  $m_{\text{k3}}$  – масса клубней 3-ой фракции, г.

Средневзвешенный размер измельченных частиц картофеля определяли:

$$l_{\text{ср}} = \frac{\frac{l_1}{2} \cdot m_0 + \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot m_1 + \frac{l_2 + l_3}{2} \cdot m_2 + \frac{l_3 + l_4}{2} \cdot (m_3 + m_4)}{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4}, \quad (3.14)$$

где  $l_{\text{ср}}$  – средневзвешенный размер измельченных частиц, мм;  $l_1$  – размер ячеек 1-ого сита, мм;  $l_2$  – размер ячеек 2-ого сита, мм;  $l_3$  – размер ячеек 3-ого сита, мм;  $l_4$  – размер ячеек 4-ого сита, мм;  $m_0$  – масса частиц фракции с 0-ого сита (дна), г;  $m_1$  – масса частиц фракции с 1-ого сита, г;  $m_2$  – масса частиц фракции с 2-ого сита, г;  $m_3$  – масса частиц фракции с 3-ого сита, г;  $m_4$  – масса частиц фракции с 4-ого сита, г.

В качестве объективного критерия оценки качества работы измельчителя-смесителя применяется показатель неоднородности (коэффициент вариации), количественно характеризующий степень разброса размеров частиц измельченного корма относительно среднего значения. Данный параметр определяется по следующей формуле [27]:

$$V_c = 100 - \frac{100}{m_{\text{изм.ср}}} \sqrt{\frac{\sum (m_i - m_{\text{изм.ср}})^2}{n - 1}}, \quad (3.15)$$

где  $V_c$  – величина относительной неоднородности или коэффициент вариации, %;  $m_i$  – масса частиц  $i$ -ой фракции, г;  $m_{изм.ср}$  – средняя масса измельченных частиц всех фракций, г;  $n$  – количество фракций, шт.

$$m_{изм.ср} = \frac{m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4}{n}. \quad (3.16)$$

Согласно СТО АИСТ 1.14.2–2020, для измельчённых грубых кормов показатель неоднородности (коэффициент вариации) должен быть не более 15 %, а для измельчённых сочных кормов — не более 20 % [135].

Анализ существующих критериев оценки работы измельчителя-смесителя показывает, что такие параметры, как степень измельчения и неоднородность фракционного состава, не являются достаточными для комплексной оценки качества готового продукта. Согласно зоотехническим требованиям [136], корнеклубнеплоды, предназначенные для скармливания животным в составе кормовых смесей, должны иметь специфическую форму пластин с шириной 10 – 30 мм и толщиной 5 – 10 мм.

Для количественной оценки соответствия готового продукта данным требованиям предлагается критерий, определяющий процентное содержание целевой фракции частиц размером 5 – 20 мм в общей массе измельченного материала. Расчет данного показателя производится по формуле [69]:

$$\theta = \frac{m_{5...20}}{\sum m_i} \cdot 100. \quad (3.17)$$

где  $\theta$  – содержание измельченных частиц корма размером 5 – 20 мм, %;  $m_{5...20}$  – масса измельченных частиц корма размером 5 – 20 мм, г;  $\sum m_i$  – масса измельченных частиц корма (масса навески), г.

### 3.7 Методика определения потери сока

Экспериментальное определение потерь сока в процессе измельчения клубней картофеля выполнялись с использованием экспериментальной

установки при установленных ранее режимах работы измельчителя-смесителя.

Перед началом экспериментов клубни картофеля тщательно промывались и высушивались, далее производится взвешивание навески клубней картофеля (масса до измельчения).

Следующим этапом работы является настройка измельчителя-смесителя на основе ранее проведенных экспериментальных исследований, в ходе которых были установлены рациональные параметры его функционирования.

Далее включается питание измельчителя-смесителя, подается подготовленная порция клубней и происходит их измельчение.

После, полученная масса взвешивается и помещается в предварительно изготовленные из технической марли мешки (рисунок 3.18). Марлевые мешки с измельчённым кормом подвешиваются и выдерживаются на протяжении 120 минут.



*Рисунок 3.18 – Марлевые мешки с измельчённым кормом*

Исходя из разницы массы, определяли процент выделившегося сока ( $x$ ):

$$\chi = \frac{(m_{k1} - m_2) + (m_2 - m_3)}{m_1} \cdot 100, \quad (3.17)$$

где  $m_{k1}$  – масса исходной навески (клубней), кг;  $m_2$  – масса измельченной навески, кг;  $m_3$  – масса измельченной навески после выдержки, кг.

Методика экспериментальных исследований включает изучение физико-механических свойств картофеля, проверку теоретических положений и обоснование параметров работы измельчителя-смесителя с использованием стандартизированного измерительного оборудования, регламентированных методик определения влажности, коэффициентов трения и работы резания, а также планирования многофакторного эксперимента для оценки влияния конструктивных и режимных факторов на энергоемкость, степень измельчения и потери сока, что в совокупности формирует надежную экспериментальную базу для верификации теоретических разработок и оптимизации процесса измельчения.

## Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

### 4.1 Физико-механические свойства картофеля

Одним из важных показателей, характеризующих физико-механические и технологические свойства клубней, является влажность, конкретные значения которой необходимы для выявления влияния конструктивно-технологических режимов измельчителя-смесителя на потери сока. Определение влажности клубней проводилось согласно изложенной методике. Для исследований применялись следующие сорта картофеля «Гала», «Королева Анна», «Ред Скарлет», «Лорх». При этом с каждого сорта брали клубни с различными условиями хранения. Результаты исследования были сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства картофеля

Показатели	Единица измерения	Картофель
Влажность	%	74,21 – 80,69
Диаметр	мм	35 – 65
Длина	мм	55 – 100

Таким образом, проведенные исследования влажности клубней различных сортов картофеля, выращенных в разных условиях хранения, позволили получить важные данные о физико-механических свойствах картофеля. Установленный диапазон влажности (74,21 – 80,69 %) является ключевым параметром при проектировании и оптимизации работы измельчителя-смесителя. Полученные значения влажности в сочетании с данными о диаметре и длине клубней (35 – 65 мм и 55 – 100 мм соответственно) дают полное представление о физических характеристиках сырья.

## 4.2 Результаты определения удельной работы резания клубней картофеля

Согласно методике, приведенной в главе 3 диссертации, были проведены экспериментальные исследования параметров резания клубней.

По рядам опытов была определена масса, обеспечивающая силу нормального давления  $N$ , при котором происходило смятие внешней оболочки (кожуры) испытуемого материала:

$$N = mg,$$

где  $m$  – масса гирей, кг;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для проведения экспериментов были применены ножи со следующими параметрами:

- с толщиной лезвия 1 мм и ширины фаски лезвия 4 мм;
- с толщиной лезвия 2 мм и ширины фаски лезвия 4 мм;
- с толщиной лезвия 3 мм и ширины фаски лезвия 4 мм;
- с толщиной лезвия 4 мм и ширины фаски лезвия 4 мм;
- с толщиной лезвия 5 мм и ширины фаски лезвия 4 мм.

Результаты определения площадей поперечного сечения прорезанного сегмента клубней картофеля сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Данные измерений и вычислений площадей поперечного сечения

Толщина ножа $b$ , мм	№ опытов	Высота сегмента $h$ , мм	Радиус клубней $R$ , мм	Площадь поперечного сечения $S$ , мм <sup>2</sup>
1	1	45	26,5	1 996,77
	2	35	28	1 619,38
	3	45	27,5	2 080,79
2	1	25	25,5	996,91
	2	28	29	1 262,85
	3	26	27,5	1 106,91
3	1	9	25,5	243,02
	2	13	29	442,55
	3	10	27,5	295,04

### Продолжение таблицы 4.2

4	1	9	25,5	243,52
	2	11	29	348,59
	3	10	27,5	294,94
5	1	5	20	69,89
	2	15	30	353,43
	3	7	23	114,91

Результаты определения удельной работы резания клубней с различными ножами приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Данные измерений и вычислений удельной работы резания клубней

Толщина ножа $b$ , мм	№ опытов	Параметры резания				
		Путь резания $L$ , м	Площадь $S$ , $\text{м}^2$	Усилие $P$ , Н	Сила нормального давления $N$ , Н	Удельная работа $A$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$
1	1	0,07	0,0020	18	23,25	630
	2	0,06	0,0016	18	23,25	675
	3	0,05	0,0020	14	23,25	350
	Среднее значение удельной работы $A_{ср}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$					551,67
2	1	0,070	0,00060	22	28,6	2566,67
	2	0,075	0,00065	21	27,3	2423,08
	3	0,065	0,00055	20	26,0	2363,64
	Среднее значение удельной работы $A_{ср}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$					2451,13
3	1	0,08	0,0002	23	27,7	9200
	2	0,09	0,0004	24	27,7	5400
	3	0,09	0,0003	20	27,7	6000
	Среднее значение удельной работы $A_{ср}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$					6866,67
4	1	0,100	0,000178	16	20,8	8988,76
	2	0,085	0,000178	18	23,4	8595,51
	3	0,095	0,000178	17	22,1	9073,03
	Среднее значение удельной работы $A_{ср}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$					8885,77
5	1	0,12	0,00007	10,6	18,4	18171,43
	2	0,12	0,00035	20	27,2	6857,14
	3	0,08	0,00011	16	22,6	11636,36
	Среднее значение удельной работы $A_{ср}$ , $\text{Дж}/\text{м}^2$					12221,64

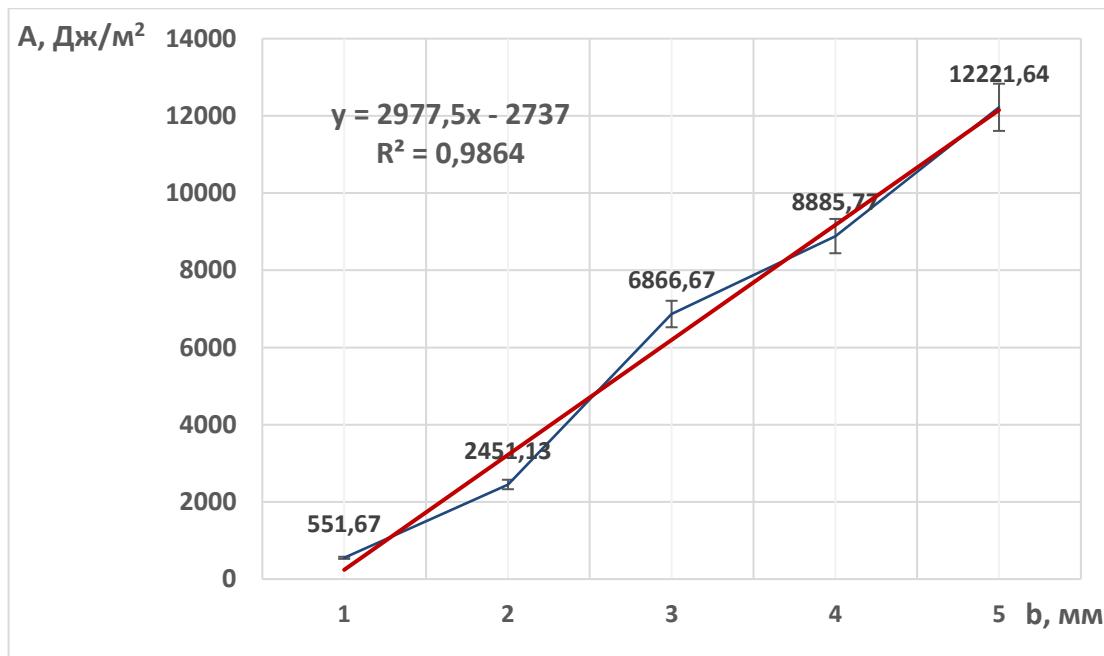
Анализ результатов, представленных в таблице 4.3, позволяет сделать ряд выводов относительно влияния толщины ножа на удельную работу резания клубней картофеля. Четко прослеживается тенденция увеличения

удельной работы с ростом толщины ножа. Это свидетельствует о том, что более толстые ножи требуют больших усилий для отделения материала, что связано с увеличением сопротивления резанию и деформации клубня.

Значительные различия в значениях удельной работы при разных толщинах ножа (от 551,67 Дж/м<sup>2</sup> при толщине 1 мм до 12221,64 Дж/м<sup>2</sup> при толщине 5 мм) подчеркивают важность выбора оптимальной толщины режущего инструмента для минимизации энергозатрат и повышения эффективности процесса резания.

Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей оптимизации конструкции режущих элементов сельскохозяйственных машин и оборудования, предназначенных для обработки клубневых культур. Необходимо учитывать не только прочность ножа, но и его толщину, чтобы обеспечить оптимальный баланс между надежностью и энергоэффективностью процесса.

Для более наглядного представления результатов влияния толщины лезвий ножа на затраты энергии построен график зависимости удельной работы резания клубней картофеля от толщины лезвия (Рисунок 4.1).



*Рисунок 4.1 – Зависимость удельной работы резания клубней картофеля от толщины лезвия ножа*

Проведенные исследования демонстрируют влияние толщины лезвия ножа на энергозатраты при резке клубней картофеля. Полученный график демонстрирует прямую зависимость удельной работы резания от толщины лезвия: более толстое лезвие требует значительно больше энергии для разрезания единицы площади. Представленный график наглядно иллюстрирует эту закономерность, где при увеличении толщины лезвия от 1 мм до 5 мм удельная работа резания возрастает более чем в 22 раза. Этот факт имеет важное практическое значение при проектировании и выборе инструментов для измельчения картофеля.

Очевидно, что для оптимизации процесса резки и снижения энергопотребления следует отдавать предпочтение ножам с минимально возможной толщиной лезвия, обеспечивающей необходимую прочность и долговечность инструмента. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния других параметров лезвия, таких как угол заточки и материал, на удельную работу резания.

#### **4.3 Результаты экспериментального определения коэффициента трения**

На основании методики, приведенной в главе 3, были проведены исследования взаимодействия клубней картофеля с рабочими поверхностями. Для этого были взяты предварительно вымытые различные по величине клубни в количестве 3 шт. Каждый был взвешен ( $m$ ), измерены габаритные размеры: диаметры вдоль малой ( $d_m$ ) и большой ( $D_b$ ) осей. Далее, согласно методики, были определены углы наклона плоскости к горизонту ( $\alpha_{скольж.}$ ,  $\alpha_{качения}$ ,  $\alpha_{опрокид.}$ ), при котором каждый клубень начинал перемещаться по плоскости, причем каждый опыт повторяли в трехкратной повторности. Результаты записывались в таблицу 4.4 в соответствующую ячейку.

Анализ результатов показывает, что угол скольжения имеет тенденцию к увеличению с ростом массы и размеров клубней, что вероятно связано и площадью контакта, соответственно, большим сопротивлением скольжению.

В то же время, углы качения и опрокидывания демонстрируют меньшую зависимость от размера, однако наблюдаются определенные колебания, вероятно обусловленные формой и массой клубней.

Таблица 4.4 – Результаты экспериментальных данных определения углов трения картофеля по металлической поверхности

Тип клубня	№ опыта	Масса, m, г	Габариты клубня		Углы трения		
			d <sub>m</sub> , мм	D <sub>b</sub> , мм	α <sub>скольж.</sub>	α <sub>качения</sub>	α <sub>опрокид.</sub>
мелкое	1	37,24	38	47	32°30'	6°54'	21°27'
	2				42°50'	6°18'	26°18'
	3				47°15'	10°48'	13°51'
	<b>среднее</b>				<b>40°35'</b>	<b>7°53'</b>	<b>20°32'</b>
среднее	1	56,14	43	57	39°06'	14°03'	25°02'
	2				48°01'	8°06'	24°36'
	3				52°05'	8°51'	22°15'
	<b>среднее</b>				<b>46°34'</b>	<b>10°20'</b>	<b>23°18'</b>
крупное	1	75,76	45	61	47°05'	7°48'	22°24'
	2				44°13'	7°39'	19°18'
	3				52°15'	8°42'	17°21'
	<b>среднее</b>				<b>47°53'</b>	<b>7°56'</b>	<b>19°54'</b>

Полученные значения углов трения картофеля по металлической поверхности могут быть использованы в дальнейшем при проектировании измельчителей кормов, а также при разработке технологий хранения и переработки. Точное знание этих параметров позволит оптимизировать технологические процессы и конструктивные параметры машин.

После получения средних значений углов трения скольжения, качения и опрокидывания, были вычислены соответствующие силы и коэффициенты трения, числовые значения записаны в таблицу 4.5.

Результаты расчетных вычислений сил и коэффициентов трения представляют собой важную информацию для проектирования сельскохозяйственной техники, в частности, измельчителей кормов. Знание этих параметров позволит снизить энергозатраты и повысить эффективность работы машин.

Таблица 4.5 – Результаты вычислений сил и коэффициентов трения

Тип клубня	Масса	Сила трения			Коэффициент трения		
		$F_{\text{тр.ск}}$	$F_{\text{тр.кач.}}$	$F_{\text{тр.опр.}}$	$\mu$	$\lambda_{\text{кач.}}$	$\lambda_{\text{опр.}}$
мелкое	37,24	0,24	2,7	6,8	0,86	0,14	0,37
среднее	56,14	0,59	4,8	8,6	1,05	0,18	0,43
крупное	75,76	0,84	4,8	9,1	1,11	0,14	0,36

В заключение следует отметить, что дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния различных факторов (влажность, температура, состояние поверхности) на параметры трения картофеля, будут способствовать более глубокому пониманию процессов, происходящих при его обработке, и, как следствие, повышению качества конечной продукции.

#### 4.4 Результаты по определению удельного расхода энергии

Согласно методике, приведенной в подразделе 3.4.1, были проведены эксперименты по определению электрических и энергетических показателей экспериментальной установки с помощью переносного измерительного комплекта типа К-50. Для этого, предварительно были подготовлены навески клубней картофеля в количестве 12 шт. Далее, согласно методики, устанавливается необходимая частота вращения ротора, в бункер засыпается взвешенная навеска, засекается время, за которое происходит измельчение клубней, каждый опыт с одной частотой вращения повторяли в трехкратной повторности.

Показания приборов измерительного комплекта К-50 и секундомера, а также результаты действительных значений напряжения, силы тока и потребляемой мощности измельчителя-смесителя приведены в приложении Б.

Проведенные измерения позволили получить данные о характеристиках измельчителя-смесителя в зависимости от частоты вращения. Анализ результатов, представленных в таблицах, приложения демонстрирует закономерное увеличение потребляемой мощности с ростом скорости вращения ножей. Это объясняется увеличением механической работы,

необходимой для измельчения и смещивания продукта при более высоких оборотах. Стоит отметить, что значения силы тока холостого хода остаются относительно стабильными во всем диапазоне исследуемых частот, что свидетельствует о незначительном влиянии скорости вращения на потери, связанные с внутренним трением и сопротивлением обмоток двигателя. Однако, сила тока при нагрузке возрастает вместе с частотой вращения, отражая увеличение нагрузки на двигатель при обработке продукта.

По результатам полученных данных были определены производительность и удельная энергоемкость с четырьмя вариантами комбинаций рабочих органов измельчителя-смесителя при различных частотах вращения ротора (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Показатели производительности и удельной энергоемкости измельчителя-смесителя при различных комбинациях рабочих органов

Частота вращения ротора	Комбинация рабочих органов												
	7 ножей с лопастью швырялки против вращения	7 ножей с лопастью швырялки по направлению вращения	8 ножей с лопастью швырялки по направлению вращения	8 ножей с лопастью швырялки против вращения	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$E_{уд}$ , Вт·с/кг	$Q$ , кг/с						
800	1679,4	0,24	2098,45	0,223	1800	1679,4	0,24	2098,45	0,223	1858,53	0,212	2225,91	0,21
1000	2478,9	0,23	3333,33	0,203	1000	2478,9	0,23	3333,33	0,203	3283,79	0,193	3098,5	0,19
1200	3929,3	0,2	5111,54	0,167	1200	3929,3	0,2	5111,54	0,167	3971,79	0,163	3500	0,15
1400	6700	0,12	7778,88	0,116	1400	6700	0,12	7778,88	0,116	7383,29	0,121	6500	0,11

По результатам были построены графики изменения удельной энергоемкости процесса в зависимости от частоты вращения ротора измельчителя-смесителя. Результаты экспериментов обрабатывались в программе Microsoft Excel с помощью функции «сглаживание» (рисунки 4.2 – 4.5).

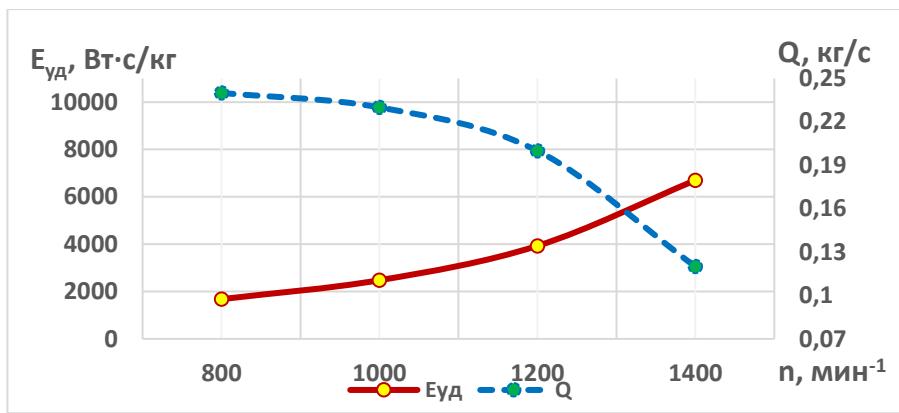


Рисунок 4.2 – Зависимость удельной энергоемкости и пропускной способности измельчителя-смесителя от частоты вращения ротора с 7 рядами ножей и лопастью швырялки загнутой против вращения

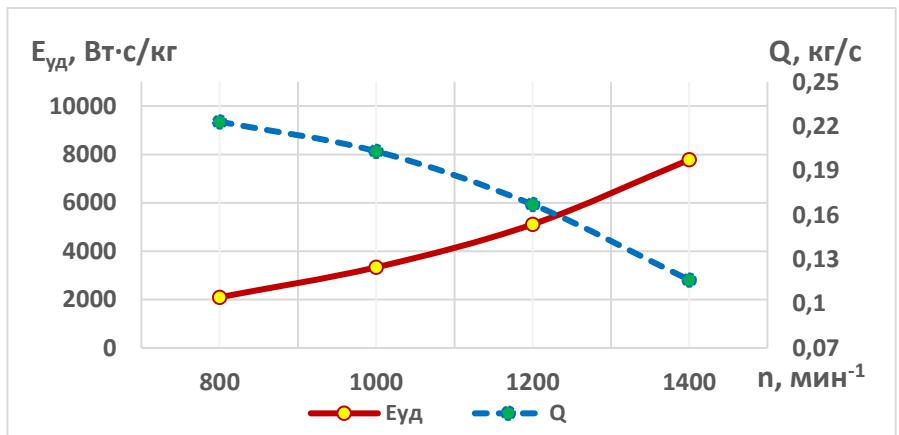


Рисунок 4.3 – Зависимость удельной энергоемкости и пропускной способности измельчителя-смесителя от частоты вращения ротора с 7 рядами ножей и лопастью швырялки загнутой по направлению вращения

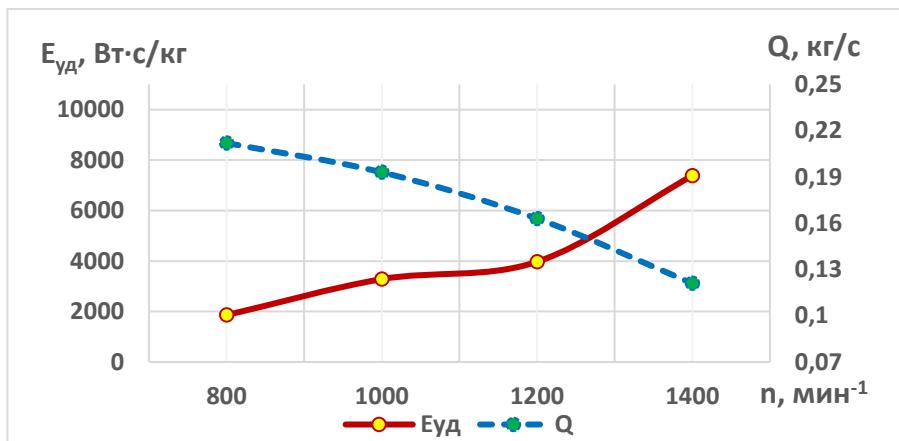


Рисунок 4.4 – Зависимость удельной энергоемкости и пропускной способности измельчителя-смесителя от частоты вращения ротора с 8 рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой по направлению вращения

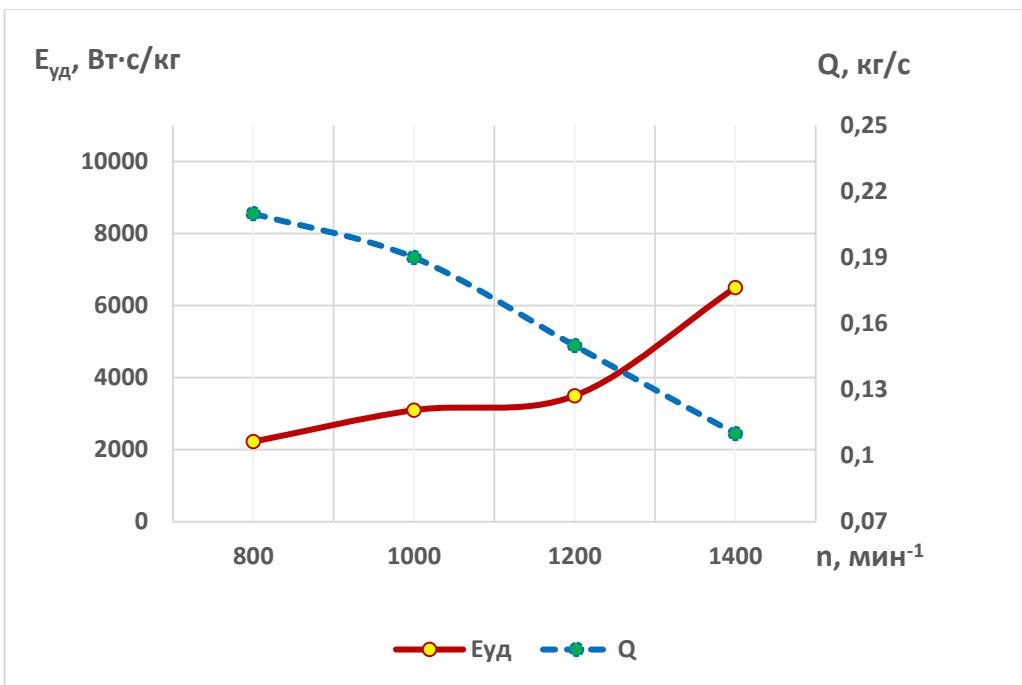


Рисунок 4.5 – Зависимость удельной энергоемкости и пропускной способности измельчителя-смесителя от частоты вращения ротора с 8 рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой против направления вращения

Анализ графиков выявляет четкую взаимосвязь между частотой вращения измельчителя-смесителя и его производительностью, а также удельными энергозатратами. Увеличение частоты вращения приводит к значительному росту удельной энергоемкости, что выражается в экспоненциальном увеличении потребления энергии в расчете на килограмм обработанного материала.

Одновременно с ростом энергозатрат, наблюдается снижение производительности ( $Q$ ) при увеличении частоты вращения. Это говорит о том, что попытка ускорить процесс измельчения и смешивания путем повышения частоты вращения приводит к обратному эффекту – снижению эффективности и увеличению энергетических потерь.

Наиболее подходящий режим работы измельчителя-смесителя будет определяться не максимальной частотой вращения, а компромиссом между производительностью и энергоэффективностью, учитывая качество полученного продукта.

## **4.5 Результаты влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя на степень измельчения и однородность измельченного корма**

Целью экспериментов являлась проверка адекватности теоретических положений и математических зависимостей по обоснованию конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, а также выявление зависимостей выходных параметров, оценивающих качество конечного продукта: степень измельчения и однородность измельченного корма от частоты вращения, количества рядов измельчающих ножей и направления лопастей швырялки выгрузной камеры.

Определение степени измельчения и однородности измельченного материала проводились на специально созданной лабораторно-производственной установке, по разработанной нами методике, описанной в разделе 3. Значения угла направляющих пластин  $\gamma$  устанавливались, исходя из рекомендаций и составляли около  $15^\circ$  [27, 42, 69].

Испытания проводили на картофеле, средний диаметр клубней которого составлял  $48 - 52$  мм. Частоту вращения ротора задавали равной  $800 \text{ мин}^{-1}$ ,  $1000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $1200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $1400 \text{ мин}^{-1}$ . Исследования проводили с четырьмя вариантами комбинаций рабочих органов измельчителя-смесителя.

После пропуска каждой навески клубней через лабораторно-производственную установку полученный корм разделили на 5 фракций с помощью ситового классификатора (рисунок 3.18) и выполнили взвешивание каждой фракции на весах ВК-600.1. Результаты всех взвешиваний приведены в приложении В. На основе среднеарифметических значений полученных результатов были определены степень измельчения для каждой комбинации рабочих органов и частоты вращения ротора (таблица 4.7)

Анализ полученных данных, представленных в таблице 4.7, позволяет сделать ряд важных выводов о влиянии различных комбинаций рабочих органов и частоты вращения на степень измельчения материала. Наблюдается

тенденция увеличения степени измельчения с ростом частоты вращения, что вполне ожидаемо, так как более высокая скорость приводит к увеличению ударной нагрузки и, следовательно, к более мелкому измельчению. Очевидно, что конфигурация рабочих органов, включающая 8 ножей и лопастью швырятки против направления вращения, при частоте вращения 1400 мин<sup>-1</sup> демонстрирует наиболее высокую степень измельчения, достигая значения 5,10571. Это свидетельствует о том, что данная комбинация обеспечивает наиболее эффективное разрушение структуры исходного материала.

Таблица 4.7 – Результаты отношения среднего размера исходного материала к среднему размеру частиц измельчённого продукта (степень измельчения)

Комбинации рабочих органов	7 ножей с лопастью швырятки по направлению вращения	7 ножей с лопастью швырятки против вращения	8 ножей с лопастью швырятки по направлению вращения	8 ножей с лопастью швырятки против вращения
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	степень измельчения			
800	3,487206	3,108726	3,216668	3,802293
1000	3,924522	3,205021	3,953679	3,839942
1200	4,347828	3,535159	4,411203	4,273579
1400	4,769514	4,119216	4,687377	5,10571

В то же время, наименьшая степень измельчения наблюдается при использовании 7 ножей и лопастью швырятки против направления вращения при частоте 800 мин<sup>-1</sup> (3,108726). Это может быть связано с недостаточной энергией, передаваемой материалу при низкой частоте вращения, а также с менее оптимальной конфигурацией рабочих органов для данного типа материала.

В целом, наблюдается тенденция к увеличению степени измельчения с ростом частоты вращения, что вполне закономерно. Однако, эффективность различных комбинаций рабочих органов при разных частотах вращения варьируется, что указывает на необходимость оптимизации параметров измельчения в зависимости от конкретных задач и характеристик исходного

материала. Дальнейшие исследования могут быть направлены на более детальное изучение взаимодействия между рабочими органами и материалом, а также на разработку математических моделей, позволяющих прогнозировать степень измельчения при различных условиях.

Полученные данные подчеркивают важность оптимизации не только частоты вращения, но и конструкции рабочих органов измельчителя для достижения максимальной степени измельчения. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния угла наклона ножей, формы швырялки и геометрии камеры на эффективность процесса измельчения. Это позволит разработать более совершенные конструкции измельчителей, обеспечивающие требуемую степень измельчения при минимальных энергозатратах.

Следующим показателем работы измельчителя-смесителя, который определяли на основании проведенных опытов, является коэффициент вариации – показатель, отражающий степень разброса значений размеров измельченного корма относительно среднего значения размера частиц (показатель неоднородности), результаты которых приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Показатели неоднородности размеров измельченного корма

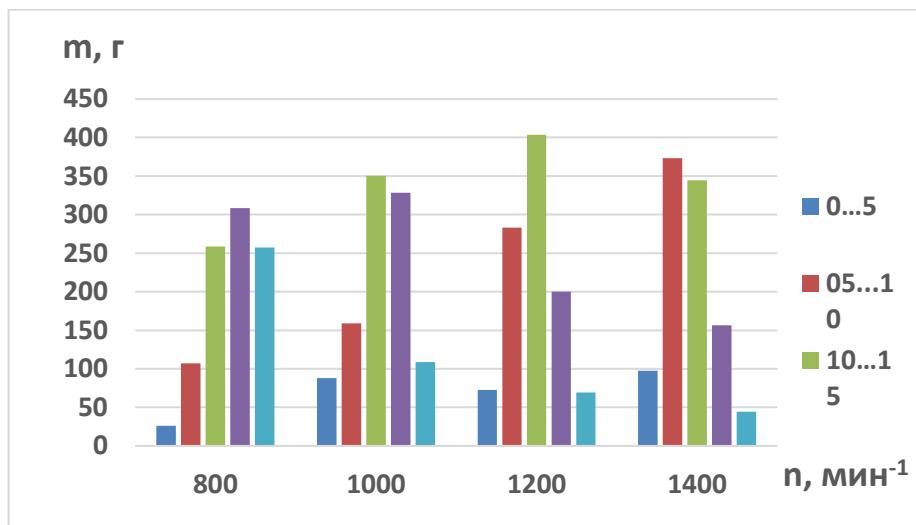
Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	7 ножей с лопастью швырялки по направлению вращения	7 ножей с лопастью швырялки против направления вращения	8 ножей с лопастью швырялки по направлению вращения	8 ножей с лопастью швырялки против направления вращения
800	32,6424	17,6892	21,2987	41,1759
1000	35,1043	18,0622	32,1145	37,2925
1200	25,6068	23,7976	17,2023	20,3425
1400	22,2977	15,2617	16,6135	14,3404

Анализ коэффициента вариации, представленного в таблице 4.8, позволяет оценить эффективность измельчения и смешивания корма в зависимости от частоты вращения и направления лопасти швырялки выгрузной камеры измельчителя-смесителя. Очевидно, что данный показатель является ключевым для достижения оптимальной однородности кормовой

массы. Разброс значений коэффициента вариации демонстрирует, что на степень однородности измельченного корма оказывают влияние как частота вращения, так и направление лопасти швырялки выгрузной камеры. В некоторых режимах работы достигается более равномерное измельчение, что указывает на оптимальное сочетание параметров работы измельчителя-смесителя.

В целом, полученные данные подчеркивают необходимость тщательного подбора режимов работы измельчителя-смесителя для обеспечения требуемой однородности корма. Дальнейшие исследования могут быть направлены на выявление оптимальных комбинаций частоты вращения и направления лопасти швырялки, а также на изучение влияния других факторов, таких как тип и влажность корма, на показатели однородности. Это позволит разработать более эффективные стратегии измельчения и смешивания кормов, что, в свою очередь, положительно скажется на здоровье и продуктивности животных.

На основе полученных данных были построены графики изменения фракционного состава измельченной массы в зависимости от частоты вращения ротора (рисунки 4.6-4.9).



*Рисунок 4.6 – Зависимость размеров фракций измельченного продукта от частоты вращения ротора с 7 рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой по направлению вращения*

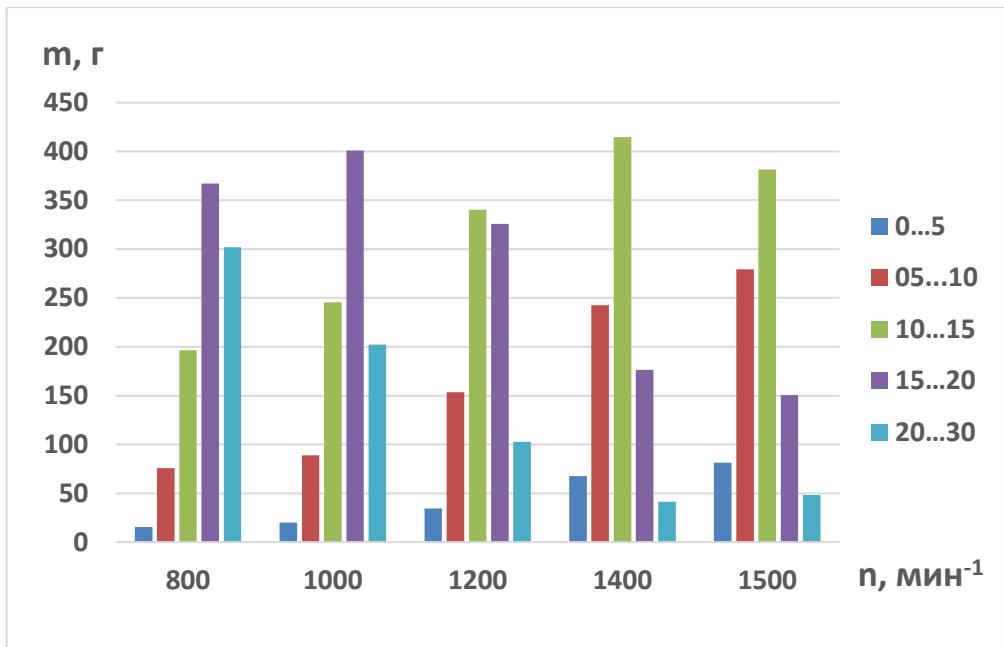


Рисунок 4.7 – Зависимость размеров фракций измельченного продукта от частоты вращения ротора с 7 рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой против направления вращения

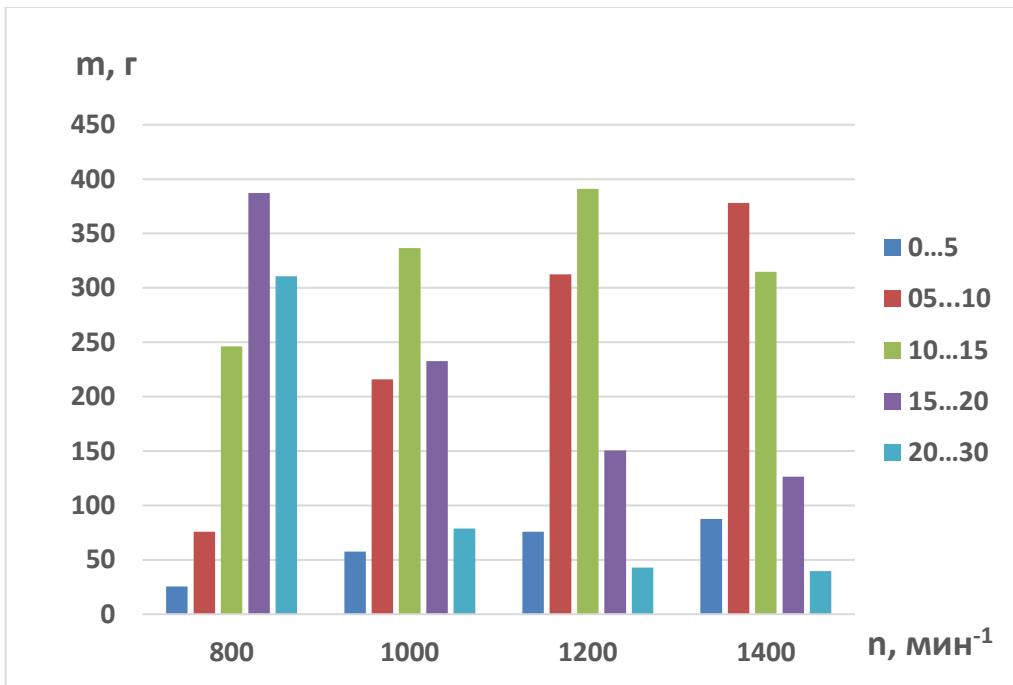


Рисунок 4.8 – Зависимость размеров фракций измельченного продукта от частоты вращения ротора с 8 рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой по направлению вращения

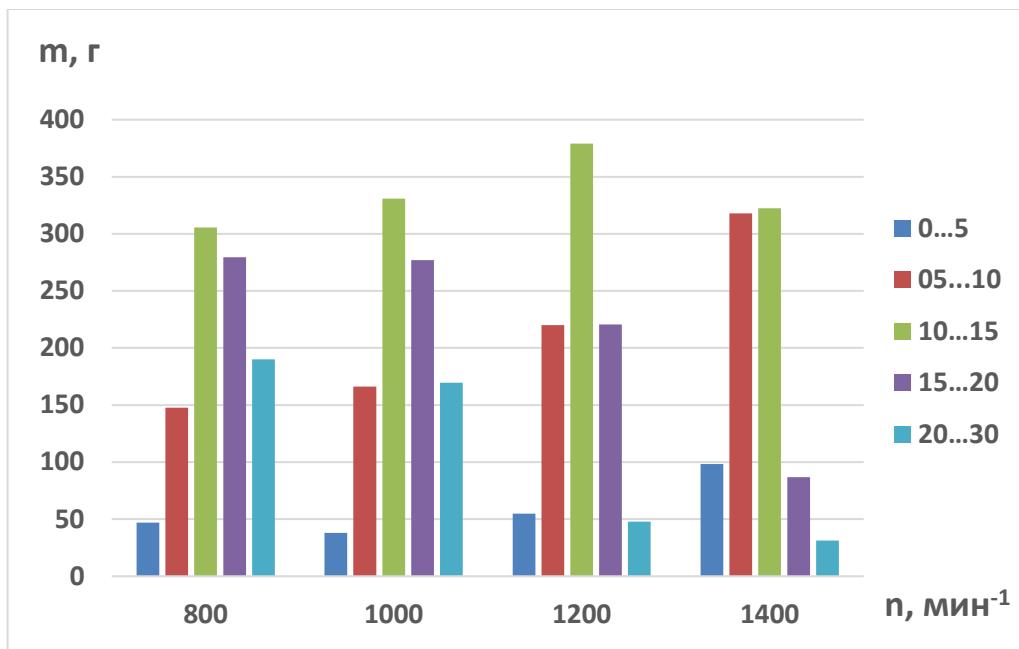


Рисунок 4.9 – Зависимость размеров фракций измельченного продукта от частоты вращения ротора с 8 рядами ножей и направлением лопасти швырялки, загнутой против направления вращения

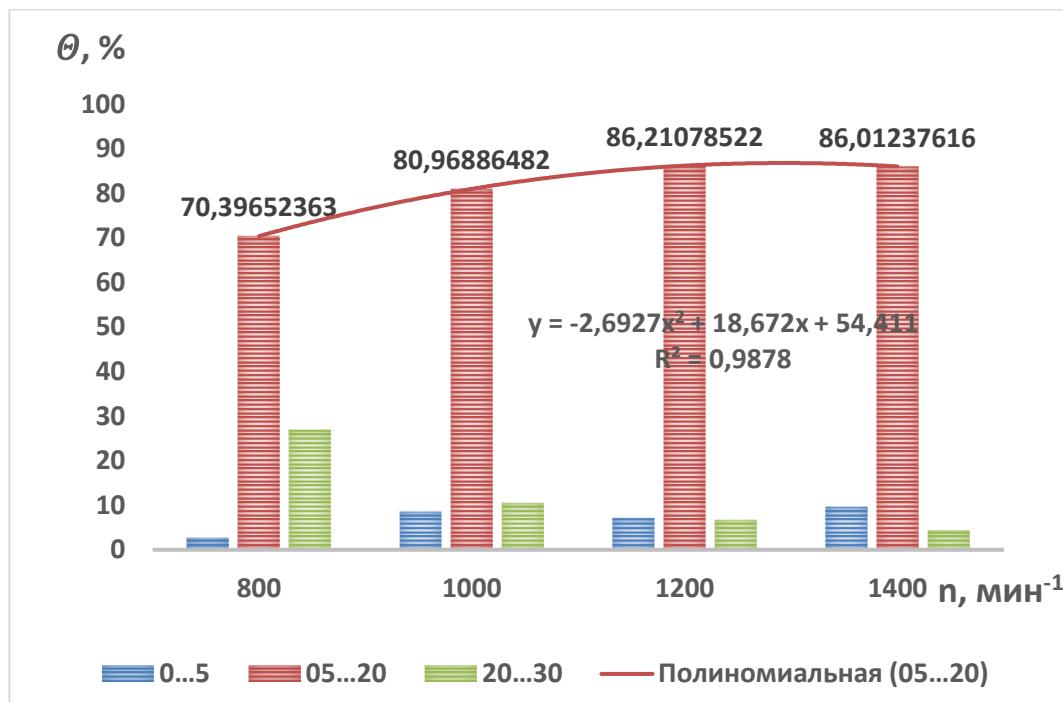
Анализ влияния частоты вращения ротора на фракционный состав измельченной массы выявил ряд закономерностей, общих для всех исследованных комбинаций рабочих органов измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. Прежде всего, увеличение частоты вращения ротора в целом приводит к увеличению доли мелких фракций (0 – 5 мм) и снижению доли крупных фракций (20 – 30 мм). Этот эффект обусловлен более интенсивным измельчением материала на высоких скоростях. Характер влияния скорости вращения на фракционный состав существенно зависит и от конфигурации рабочих органов. Использование 8-ми рядов ножей в сочетании с лопастью швырялки, направленной по направлению вращения, способствует более интенсивному измельчению по сравнению с 7-ю рядами ножей и лопастью, направленной против вращения. Это проявляется в большем содержании мелких фракций при одинаковой частоте вращения ротора.

В связи с тем, что только степень измельчения и неоднородность не могут быть показателями критерия оценки работы машины, 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 (рисунки 4.10-4.13).

Анализ диаграмм позволяет сделать ряд важных выводов о влиянии конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя на качество измельчения корма. Очевидно, что частота вращения ротора, количество рядов ножей и направление лопасти швырялки оказывают существенное воздействие на процентное содержание частиц оптимального размера (5 – 20 мм).



*Рисунок 4.10 – Зависимость процентного содержания частиц размером 5 – 20 мм в общей массе измельченного продукта от частоты вращения ротора с 7 рядами ножей и лопастью швырялки, загнутой по направлению вращения*

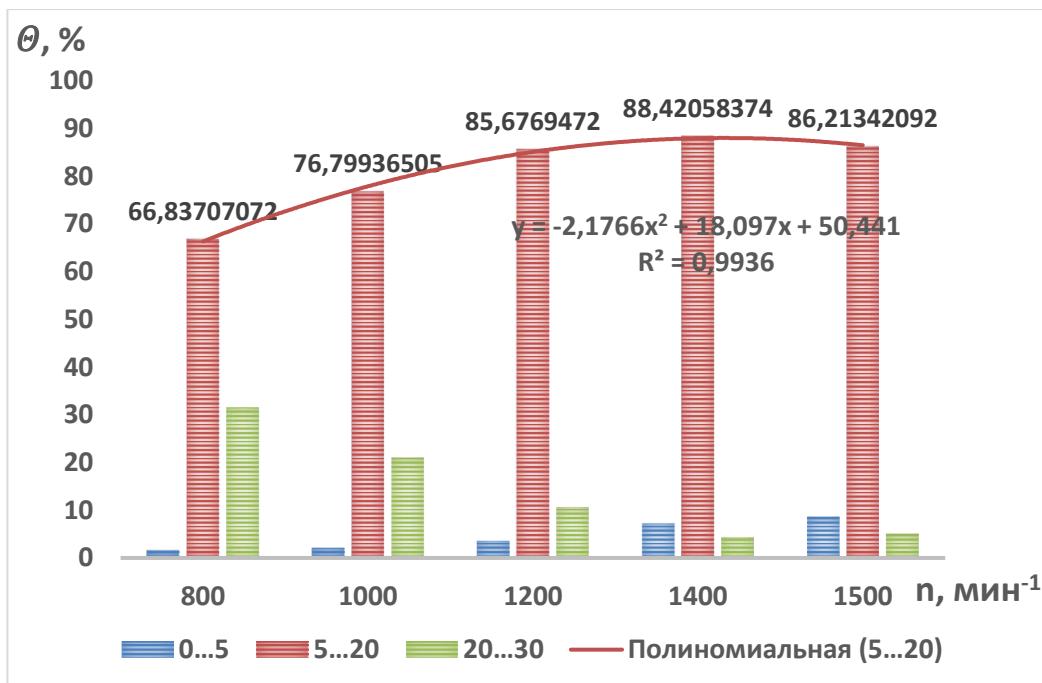


Рисунок 4.11 – Зависимость процентного содержания частиц размером 5–20 мм в общей массе измельченного продукта от частоты вращения ротора с 7 рядами ножей и направлением лопасти швырялки, загнутой против вращения

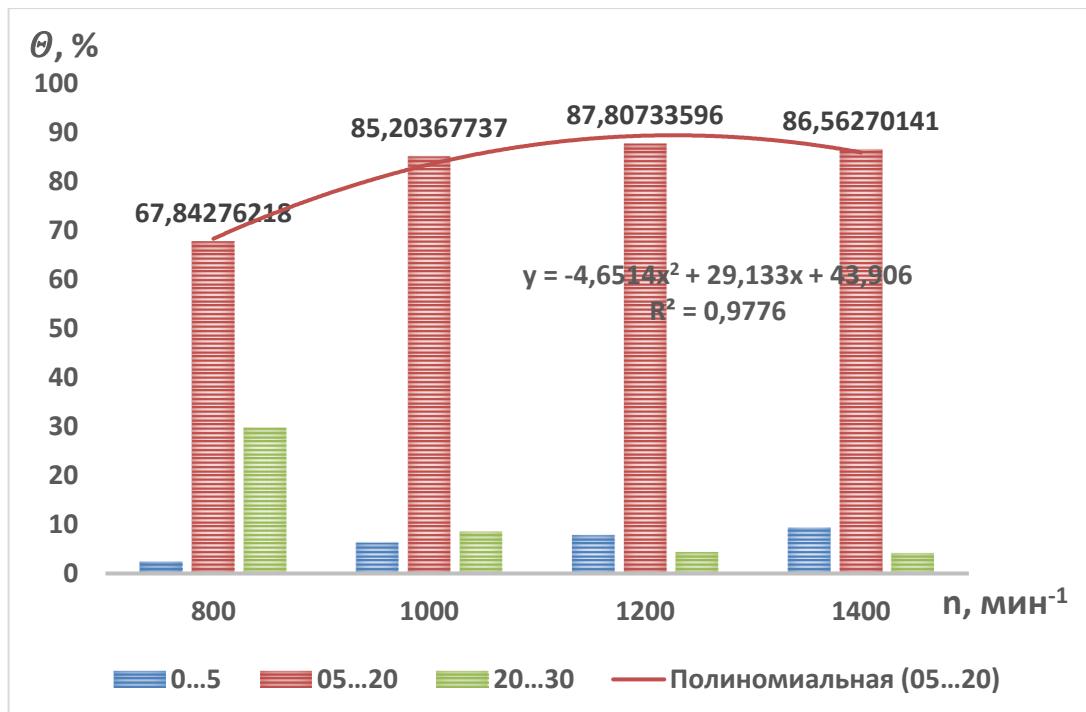


Рисунок 4.12 – Зависимость процентного содержания частиц размером 5–20 мм в общей массе измельченного продукта от частоты вращения ротора при 8 ножах и швырялки с лопастью, загнутой по направлению вращения

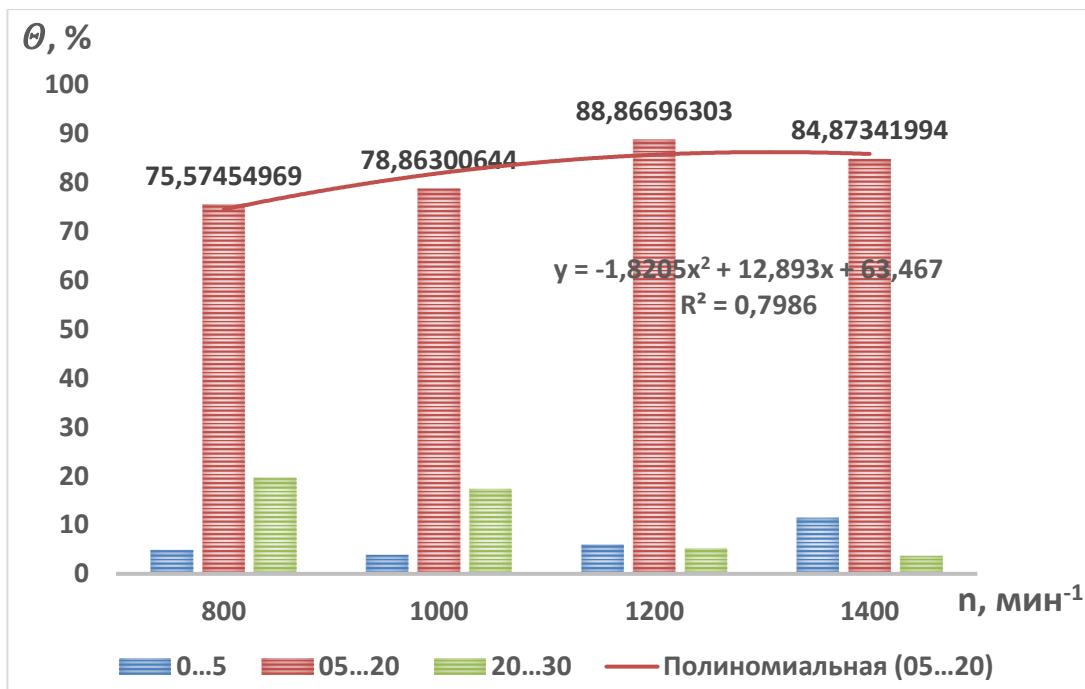


Рисунок 4.13 – Зависимость процентного содержания частиц размером 5 – 20 мм в общей массе измельченного продукта от частоты вращения ротора при 8 ножах и лопастью швырялки загнутой против направления вращения

В целом, увеличение частоты вращения ротора способствует повышению доли частиц размером 5 – 20 мм, что соответствует зоотехническим требованиям. Однако, необходимо учитывать, что при слишком высоких оборотах происходит чрезмерное измельчение, приводящее к увеличению доли мелких фракций (0 – 5 мм) и снижению доли крупных (20 – 30 мм).

Влияние количества рядов ножей и направления лопасти швырялки наглядно демонстрирует, что оптимальная конфигурация измельчителя-смесителя может быть подобрана для достижения максимального содержания частиц необходимого размера. Экспериментальные данные подтверждают, что варьирование этими параметрами позволяет гибко настраивать процесс измельчения под конкретные потребности животноводства. Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на разработку автоматизированных систем управления измельчением, способных

адаптироваться к различным видам кормов и требованиям к конечному продукту.

#### **4.6 Результаты влияния конструктивно-технологических параметров измельчителя-смесителя на потери сока**

Учёт потерь сока в процессе измельчения клубней картофеля необходим для контроля качества конечной продукции, оптимизации технологического процесса и снижения производственных затрат. По данным из литературных источников [137, 138], при использовании измельчителей потери сока корнеклубнеплодов может составлять до 6% по массе.

Согласно методики (раздел 3.7) определения потерь сока при измельчении картофеля, нами зафиксированы среднеарифметические значения масс исходной навески (клубней), измельченных кормов и измельченной навески после выдержки в течении 120 минут. Далее, используя формулу (3.11) вычислены процент выделившегося сока ( $x$ ), принятый в качестве потерь (таблица 4.9).

**Таблица 4.9 – Экспериментальные данные по определению потерь сока при измельчении**

Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Масса навески до измельчения, кг	Масса измельченного корма после выдержки, кг	Потери сока, %
800	0,995	0,985	1,005025
1000	1,002	0,982	1,996008
1200	1,015	0,992	2,26601
1400	1,015	0,975	3,940887

Для выявления закономерности зависимости потери сока от частоты вращения ротора по полученным данным построен график (рисунок 4.14).

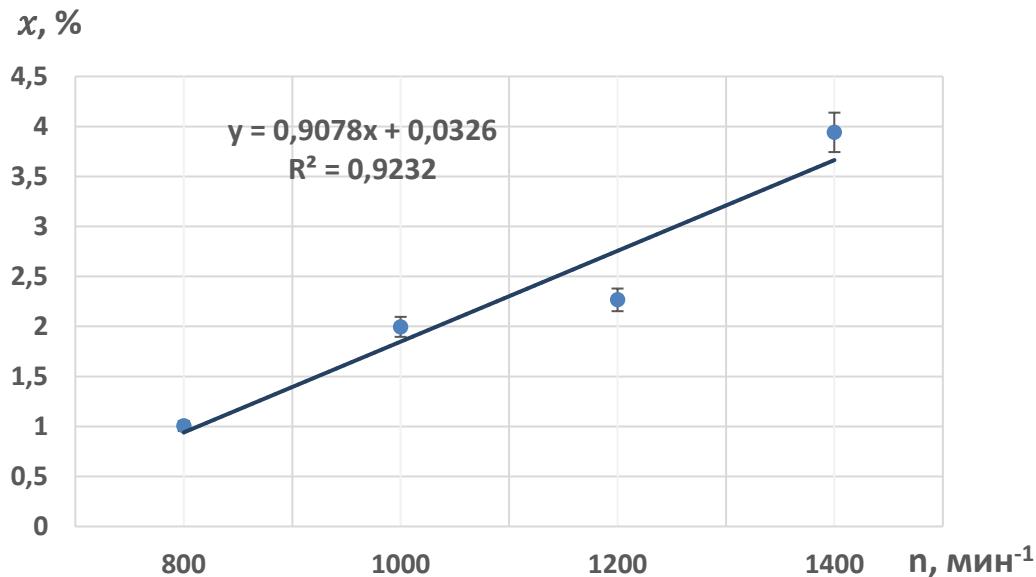


Рисунок 4.14 – Зависимость потерь сока от частоты вращения

Представленный график наглядно демонстрирует, что частота вращения ротора оказывает непосредственное влияние на потери сока при измельчении картофеля. Наблюдается четкая тенденция к увеличению потерь сока с ростом частоты вращения, что, вероятно, связано с более интенсивным разрушением клеточной структуры клубней и высвобождением большего количества влаги под воздействием центробежных сил.

Сравнение полученных экспериментальных значений с литературными данными показывает, что при частотах вращения 800–1200 мин<sup>-1</sup> потери сока находятся в пределах допустимых значений. Однако, при частоте 1400 мин<sup>-1</sup> потери приближаются к верхнему пределу, указанному в литературных источниках (6%) [137, 138], что может негативно сказаться на качестве конечного продукта.

В результате проведенных экспериментов выявлено:

1. Диапазон влажности клубней составил 74,21 – 80,69 %, а также их геометрические размеры (диаметр 35 – 65 мм, длина 55 – 100 мм).
2. Выявлена прямая зависимость удельной работы резания от толщины ножа: увеличение толщины с 1 мм до 5 мм приводит к росту энергозатрат

более чем в 22 раза, т.е. увеличение толщины лезвия на 1 мм приводит к 4,4-кратному росту удельной работы резания.

3. Определены углы и коэффициенты трения скольжения, качения и опрокидывания для клубней разного размера. Значения коэффициента трения скольжения варьируются от 0,86 до 1,11, что важно для расчёта усилий в рабочих органах машин.

4. Рост частоты вращения ротора ( $800\ldots1400 \text{ мин}^{-1}$ ) приводит к значительному увеличению удельной энергоёмкости – 1679 – 7779 Вт·с/кг (в зависимости от комбинации рабочих органов) и одновременному снижению производительности 0,24 – 0,11 кг/с.

5. Увеличение частоты вращения и оптимизация конфигурации рабочих органов повышают степень измельчения и однородность. Лучшие показатели процентного содержания частиц размером 5 – 20 мм достигаются при частоте вращения ротора  $1200 \text{ мин}^{-1}$ , при чём наивысшее значение (88,87 %) при комбинации рабочих органов с 8 рядами ножей и направлением лопасти швырялки против направления вращения.

6. С ростом частоты вращения потери сока увеличиваются. Сравнение полученных экспериментальных значений с литературными данными показывает, что при частотах вращения ротора  $1000\ldots1200 \text{ мин}^{-1}$  потери сока находятся в пределах допустимых значений (1,9 – 2,7 %). А при  $1400 \text{ мин}^{-1}$  потери достигают 3,94 %, что близко к критическому значению, указанному в литературе (до 6 %).

## **Глава 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ**

### **5.1 Оценка показателей эффективности измельчителя-смесителя в производственных условиях**

Производственные испытания экспериментального измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов с целью проверки его работоспособности и влияния конструктивных и технологических параметров на эффективность измельчения картофеля были проведены в ИП «Имамеева Финавзия Минехановна» Рыбно-Слободского района Республики Татарстан (Приложения Г, Д, Е, Ж).

Испытания проводились с клубнями картофеля сорта «Лорх», заготовленного по ГОСТ 7176-2017 без предварительного разделения на фракции по размерам в период с 12.04.2025 г. по 07.05.2024 г. Средний размер исходных клубней составил 45 – 55 см, влажность 78 – 79 %.

В процессе испытаний проводился хронометраж технологических операций и взвешивание продуктов измельчения. Измерение промежутков времени производилось с помощью электронного секундомера. Для взвешивания использовались электронные весы ТВМ-150. Измерение частоты вращения ротора измерялись комбинированным тахометром (2-ый класс точности). Влажность клубней определялась анализатором влажности «ЭВЛАС-2М» (погрешность влагомера – не более  $\pm 0,2\%$ ) согласно ГОСТ 13496.3-92 «Комбикорма, комбикормовое сырьё. Методы определения влаги» и ГОСТ 28561-90 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги».

Режим работы и характеристика измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов:

- частота вращения ротора измельчителя-смесителя, мин<sup>-1</sup> ..... 1000-1400
- мощность электродвигателя, кВт..... 1,5

- потребная мощность измельчителя-смесителя, кВт .....	0,75
- производительность, т/час .....	0,5
- масса измельчителя-смесителя, кг .....	65
- количество рядов ножей, шт. ....	8
- влажность клубней картофеля, % .....	78,56

Разработанный на кафедре машин и оборудования в агробизнесе ФГБОУ ВО Казанский ГАУ измельчитель-смеситель для приготовления кормов в условиях сельхозпредприятий в результате производственных испытаний показал хорошую работоспособность при измельчении клубней картофеля с влажностью 78,56 % для скармливания животным в течении с 12 апреля по 07 мая 2025 г (Приложения Е, Ж).

По итогам испытаний установлено, что производительность машины, в зависимости от частоты вращения, составляет 0,42 – 0,58 т/ч, при этом степень измельчения – 4,5; однородность – 90 %; потери сока 2,1 %.

## **5.2 Энергетическая оценка и сравнение разработанного устройства с серийным измельчителем корнеплодов К-300**

Энергетический анализ служит инструментом для сравнительной оценки перспективности технологий на основе критерия их энергетической эффективности [139]. В качестве основного оценочного показателя принят коэффициент энергетической эффективности, определяемый как отношение энергии, запасенной в конечном продукте, к совокупным энергозатратам на его производство. В структуру последних включаются прямые энергозатраты технологического процесса, затраты живого труда, а также энергоемкость используемого оборудования и производственных помещений. Прямые затраты энергии определяются потреблением электроэнергии, с учетом коэффициента перевода и дополнительных затрат. Фактические затраты электроэнергии рассчитываются как отношение затрат энергии на измельчение к массе переработанного продукта [139-142].

Техническая характеристика экспериментального измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов и измельчителя корнеплодов К-300 производства ООО «Агропост50», а также расчетные энергетические показатели представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительная энергетическая оценка экспериментального измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов с измельчителем корнеплодов К-300

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Цифровые значения		Динамика показателей, %
			К-300	Э-ИСК-05	
1	Масса	кг.	45	65	+44,4%
2	Потребная мощность	кВт	2,0	0,75	-62,5%
3	Количество обслуживающего персонала	чел.	1	1	-
4	Разряд работ	-	IV	IV	-
5	Норма амортизации	%	16,2	16,2	-
6	Годовая загрузка	час.	600	600	-
7	Прямые затраты энергии	МДж/т	24,01	5,4	-77,5%
8	Энергозатраты живого труда	МДж/т	0,6	0,6	-
9	Энергоемкость оборудования	МДж/т	0,011	0,007	-36,4%
10	Энергоемкость здания	МДж/т	40,2	40,2	-
11	Совокупные затраты энергии	МДж/т	41,01	16,6	-59,5%
12	Энергетическая эффективность	-	0,39	0,96	+146,2%
13	Коэффициент энергетических затрат	-	-	0,4	-

Анализ технико-энергетических характеристик экспериментального измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (Э-ИСК-05) в сравнении с серийным измельчителем корнеплодов К-300 выявил существенные преимущества разработанной конструкции. Несмотря на увеличение массы на 44,4 %, ключевым достоинством является снижение потребляемой мощности на 62,5 %.

Значительное сокращение прямых затрат энергии (на 77,5 %) и совокупных затрат энергии (на 59,5 %) подчеркивает высокую энергоэффективность разработанного устройства. Увеличение энергетической эффективности на 146,2 % свидетельствует о более рациональном использовании энергии при выполнении технологических операций. Коэффициент энергетических затрат (0,4) для Э-ИСК-05 указывает на то, что разработанное устройство требует на 60 % меньше энергии для переработки тонны продукта по сравнению с базовым аналогом. Это позволяет сделать вывод о перспективности внедрения предложенной технологии, учитывая растущую потребность в энергосберегающих решениях в сельскохозяйственной отрасли.

Полученные результаты согласуются с современными тенденциями в области энергосбережения в сельскохозяйственном производстве [140]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию конструкции Э-ИСК-05 с целью снижения массы и повышения производительности, что позволит создать конкурентоспособную и энергоэффективную технику для приготовления кормов.

### **5.3 Технико-экономическая оценка эффективности измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов**

Технико-экономический расчет эффективности разработанного измельчителя-смесителя проводили по общепринятой методике [141, 142]. За базовую конструкцию принимаем измельчитель корнеплодов К-300 (ООО «Агропост50»). Балансовая стоимость базовой и проектной конструкций составляет 22 987 и 20 000 руб., соответственно. Производительность опытного образца выше, чем у базового (0,5 против 0,3 т/ч).

Рассчитана энергоемкость процесса, металлоемкость и фондоемкость для обеих конструкций. Себестоимость работ определена с учетом затрат на

оплату труда, электроэнергию, ремонт и техническое обслуживание (РТО) и амортизационных отчислений. Затраты на оплату труда рассчитаны на основе тарифной ставки и трудоемкости, которая зависит от количества обслуживающих операторов. Затраты на электроэнергию вычислены исходя из цены электроэнергии (3,4 руб./кВтч) и потребляемой мощности. Затраты на РТО и амортизационные отчисления определены с использованием соответствующих норм.

На основе полученных данных рассчитаны уровень приведенных затрат, годовая экономия, годовой экономический эффект, срок окупаемости капитальных вложений и коэффициент эффективности капитальных вложений (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Сравнительные технико-экономические показатели эффективности конструкции

№ п/п	Наименование показателей	Един. измерен.	К-300	Э-ИСК-05	Динамика показателей, %
1.	Производительность	т/ч	0,3	0,5	+66,67
2.	Фондоемкость процесса	руб/т	127,71	66,67	-47,81
3.	Энергоемкость процесса	кВт·ч/т	6,67	1,5	-77,51
4.	Металлоемкость процесса	кг/т	0,042	0,036	-14,29
5.	Трудоемкость процесса	чел.час/т	3,33	2,00	-39,94
6.	Себестоимость работ	руб/т	1629,4	973,35	-40,26
7.	Уровень приведенных затрат	руб/т	1648,56	983,35	-40,35
8.	Годовая экономия	руб	-	196815	-
9.	Годовой экономический эффект	руб	-	199563	-
10.	Срок окупаемости капитальных вложений	лет	-	0,16	-
11.	Коэффициент эффективности капитальных вложений	-	-	6,25	-

Анализ сравнивательных технико-экономических показателей, представленных в таблице 5.2, демонстрирует существенное превосходство разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов над базовой

моделью К-300. Отмечается значительное увеличение производительности на 66,67 %, что свидетельствует о повышенной эффективности использования рабочего времени и ресурсов.

Существенное снижение фондоемкости процесса на 47,81 % указывает на более рациональное использование основных производственных фондов. При этом, энергоемкость процесса сократилась на 77,51 %, что подтверждает высокую энергоэффективность разработанной конструкции и снижение эксплуатационных затрат. Аналогичная тенденция прослеживается в снижении металлоемкости процесса на 14,29 % и трудоемкости на 39,94 %, что отражает оптимизацию материальных и трудовых затрат.

Сокращение себестоимости работ и уровня приведенных затрат на 40,26 % и 40,35 % соответственно, свидетельствует о снижении общей стоимости производства кормов. Рассчитанная годовая экономия в размере 196815 руб. и годовой экономический эффект в 199563 руб. подтверждают экономическую целесообразность внедрения разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов. Короткий срок окупаемости капитальных вложений, составляющий 0,16 лет, и высокий коэффициент эффективности капитальных вложений (6,25) подчеркивают инвестиционную привлекательность данной разработки.

В заключение проведенного анализа эффективности работы разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов (Э-ИСК-05) следует отметить существенное превосходство его технико-экономических показателей по сравнению с серийным измельчителем корнеплодов К-300. Производственные испытания 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 %).

Энергетическая оценка выявила значительное снижение энергозатрат на единицу продукции, что отражено в уменьшении прямых затрат энергии на 77,5 % и совокупных затрат энергии на 59,5 % (таблица 5.1). Увеличение

энергетической эффективности на 146,2 % свидетельствует о существенной экономии ресурсов при использовании разработанного устройства, что соответствует современным тенденциям энергосбережения в сельском хозяйстве.

Технико-экономический анализ подтвердил экономическую целесообразность внедрения Э-ИСК-05, продемонстрировав снижение себестоимости работ на 40,26 % и быстрый срок окупаемости капитальных вложений (0,16 лет). Годовой экономический эффект составил 199563 руб., что делает данную разработку инвестиционно привлекательной (таблица 5.2). Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный измельчитель-смеситель корнеклубнеплодов для широкого внедрения в сельскохозяйственном производстве, что будет способствовать повышению эффективности и снижению себестоимости производства кормов.

Рекомендации для производственного применения:

1. Внедрить конструкцию энергосберегающего измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов с конической камерой, многорядным расположением ножей и лопастной швырялкой заданной геометрии в кормоприготовительных цехах малых фермерских хозяйств для переработки кормов.

2. Оптимальным режимом работы для достижения высокого качества корма (содержание фракции 5 – 20 мм до 88 %) и умеренных энергозатрат рекомендуется считать частоту вращения ротора  $1200 \text{ мин}^{-1}$  при использовании 8 рядов ножей и лопасти швырялки, загнутой против направления вращения.

3. Для снижения потерь питательных веществ (сока) процесс измельчения корнеклубнеплодов следует организовывать непосредственно перед скармливанием (не более чем за 1,5 – 2 часа), используя сырье с влажностью не более 80 %.

## 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 пропускной способности измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов, при этом производительность составляет  $0,3 - 1,4 \text{ т/ч}$  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 лопастной швырялки. Расчетным путем установлено, что мощность на привод измельчителя-смесителя изменяется  $1,15 - 6,9 \text{ кВт}\cdot\text{с/кг}$ . 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 швырялки и его эффективной выгрузки при  $\omega = 156 \text{ с}^{-1}$ ,  $r_0 = 0,018 \text{ м}$ ,  $r_k = 0,165 \text{ м}$ ,  $f = 0,3$  теоретически обоснована необходимость выполнения лопасти, загнутой против направления вращения с радиусом кривизны  $R = 0,15 \text{ м}$ .

3. Экспериментально получены уравнения процентного содержания частиц ( $5 - 20 \text{ мм}$ ) 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<sup>-1</sup> 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 Имаммеева 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. Расчет технико-экономических показателей разработанного измельчителя-смесителя корнеклубнеплодов подтвердил снижение энергозатрат на 59,5 – 77,5 % при росте энергетической эффективности на 146,2 %, а также уменьшение 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. О Прогнозе научно-технологического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года. Приказ МСХ РФ № 3 от 12 января 2017 года [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456038646/> (дата обращения: 27.09.2021).
2. Концепция и методология устойчивого развития агропромышленного комплекса Республики Татарстан. – Казань: КГАУ, 2014. – 100 с.
3. Алёшкин, В. Р. Механизация животноводства / В. Р. Алёшкин, П. М. Рощин; под ред. С. В. Мельникова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
4. Владимиров, Н. И. Основы производства продукции животноводства: учеб. пособие / Н. И. Владимиров, Н. Ю. Владимирова, П. С. Ануфриев. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. – 191 с.
5. Инновационные проекты – агропромышленному комплексу: каталог – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. – 136 с.
6. Инновационная техника для животноводства (по материалам Международной выставки «Evro Tier-2012»): науч.-анал. обзор. – М.: ФГНУ «Росинформагротех». 2013. – 208 с.
7. Коба, В. Г. Механизация и технология производства продукции животноводства / В. Г. Коба, Н. В. Брагинец, Д. Н. Мурусидзе, В. Ф. Некрашевич. – М.: Колос, 2000. – 528 с.
8. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А. П. Калашников и др. – М.: Знание, 1993. – 396 с.
9. Коваленко, В. П. Технологические комплексы машин для приготовления кормов: учеб. пособие / В. П. Коваленко, И. М. Петренко. – Изд-во КГАУ: Краснодар, 2000. – 170 с.
10. Кузнецов, П. Н. Совершенствование технологии и техническое средство для очистки сахарной свеклы в условиях повышенной влажности и почвы: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Кузнецов Павел Николаевич. – Мичуринск-наукоград, 2015. – 149 с.

11. Синявский, В. Н. Машины и оборудования для обработки корнеклубнеплодов / В. Н. Синявский. – М.: «Машиностроение», 1964. – 110 с.
12. Фокин А.И., Халиуллин Д.Т., Кашапов И.И. Пути повышения эффективности молочного производства // Глобальные вызовы для продовольственной безопасности: риски и возможности: научные труды международной научно-практической конференции. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2021. – С. 578-586.
13. Юхин, Г.П. Совершенствование технологии и технических средств заготовки и подготовки к скармливанию кормовых корнеплодов: автореф. дисс. ...док. тех. наук: 05.20.01 / Юхин Геннадий Петрович. – Оренбург, 2006. – 34 с.
14. Хохрин, С.Н. Корма и кормление животных /С.Н. Хохрин// СПб.: «Лань». – 2002. – 512 с.
15. Коба, В.Г. Механизация и технология производства продукции животноводства / В.Г. Коба, Н.В. Брагинец, Д.Н. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич // М.: Колос. – 2000. – 528 с.
16. Юхин, Г.П., Мартынов В.М., Катков А.А., Калимуллин А.М.. В сборнике: Актуальные проблемы и пути развития животноводства / Материалы Всесоюзной научно-практической конференции в честь 75-летия основания кафедры физиологии и биохимии животных, памяти профессора П.Я. Гущина. Уфа, 2009. – С.259 - 260.
17. Зиганшин, Б.Г. Повышение эффективности технических средств приготовления кормов в животноводстве на основе расширения технологических возможностей измельчителей: дисс. ...докт. техн. наук: 05.20.01/ Зиганшин Булат Гусманович. – Казань, 2004. – 304 с.
18. Алешкин, В.Р. Повышение эффективности процесса и технических средств механизации измельчения кормов: автореф. дис. ...канд. техн. наук 05.20.01/ Алешкин Владимир Романович. – Санкт-Петербург-Пушкин, 1995. – 38 с.
18. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих

- аппаратов / Н.Е. Резник// – Москва: Машиностроение, 1975. – 311 с.
19. Сыроватка, В.И. Механизация приготовления кормов / В.И. Сыроватка, А.В. Демин, А.Х. Джалилов// – М: Агропромиздат, 1985. – 368 с.
20. Сыроватка, В. И. Модель задачи многокритериального выбора технологий и технических средств приготовления комбикормов в хозяйствах / В.И. Сыроватка, Н. М. Морозов, М. Г. Теплицкий // Всерос. н.-и. и проект.-технол. Подольск, 2004. – 41 с.
21. Пат. 2296011 Российская Федерация, МПК B02C 13/20 (2006.01), Универсальный измельчитель кормов / Зиганшин Б. Г., Волков И. Е., Хайдаров Р. Р., Файзуллин И. Ф.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Казанская ГСХА. – № 2005106831/03; заявл. 09.03.2005; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9. – 5 с.
22. Волков, И.Е. Инженерно-методическое обеспечение инновационных технологий производства продукции животноводства в современных условиях / И.Е. Волков, Б.Г. Зиганшин, А.В. Матяшин // Издательство Казанского ГАУ, 2009. – 252 с.
23. Курдюмов, В. И. К вопросу об углах установки ножей в измельчителях корнеплодов транспортерно-ножевого типа / В. И. Курдюмов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2002. – № 7. – С. 73-75.
24. Курдюмов, В. И. Оптимизация конструктивных параметров и режимов работы измельчителя корнеплодов / В. И. Курдюмов, М. Н. Лемаева // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2007. – № 6. – С. 51-53.
25. Агеев, П. С. Оценка эффективности работы установки для очистки корнеплодов / П. С. Агеев, Е. М. Горелышев, В. И. Курдюмов, А. Ю. Агеева // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 4(68). – С. 165-172. – DOI 10.18286/1816-4501-2024-4-165-172.
26. Аюгин, Н. П. Изучение процесса резания кормовой свеклы

/ Н. П. Аюгин, Н. М. Семашкин, В. И. Курдюмов, Д. Б. Романов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 4(68). – С. 173-181. DOI 10.18286/1816-4501-2024-4-173-181.

27. Брусенков, А. В. Разработка технологического процесса и устройства для измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором: дис. канд. ...техн. наук: 05.20.01 / Брусенков Алексей Владимирович. – Тамбов, 2015. – 222 с.

28. Brusenkov, A. A biotechnological system of root crops preparatin for farm animals / A. Brusenkov, V. Kapustin, V. Nemtinov, Y. Nemtinova // MATEC Web of Conferencesю. – 2020. – Vol. 329. – P. 05012.

29. Brusenkov, A. Analysis of root crop preparation system / A. Brusenkov, V. Kapustin, V. Nemtinov, Y. Nemtinova // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 176. – P. 03007.

30. Лебедь, Н. И. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы измельчителя яблок: дис. канд. ...техн. наук: 05.20.01 / Лебедь Никита Игоревич. – Волгоград, 2013. – 192 с.

31. Родионов, В. Г. Технология производства и переработки животноводческой продукции / В. Г. Родионов, Л. П. Табакова, Г. П. Табаков. – М.: Коллесс, 2005. – 512 с.

32. Забелина, М.В. Технологические основы производства и переработки продукции животноводства / М.В. Забелина, Р.А. Денисов, А.В. Продивлянов [и др.] ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2006. – 1126 с.

33. Завражнов, А.И. Механизация приготовления и хранения кормов / А.И. Завражнов, Д.И. Николаев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 336 с.

34. Макарцев, Н.Г. Технология производства и переработки животноводческой продукции / под ред. Н.Г. Макарцева. – Калуга: «Манускрипт», 2005. – 688 с.

35. Тарасенко, А.П. Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства /под ред. А.П. Тарасенко. – М.: КолосС,

2002. – 551 с.

36. Овчинников, А. А. Повышение эффективности барабанной корнеклубнемойки обоснованием конструктивно-режимных параметров: дис. ...кан. техн. наук: 05.20.01 / Овчинников Алексей Алексеевич. – Саратов, 2014. – 207 с.

37. Сыроватка, В.И. Методика расчета рабочих органов и выбора основных параметров барабанно–щеточных очистителей корнеплодов / В.И. Сыроватка, А.В. Дервиш // Сб. науч. тр. ВИЭСХ. – М., 1973. – Т. 34. – С. 130-162.

38. Иванов, Ю.А. Результаты исследований НИУ ФАНО России по созданию инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства продукции животноводства / Ю.А. Иванов // Вестник ВНИИМЖ. – 2016. № 2(22). – С. 4-13.

39. Косолапов, В. М. Эффективность применения современных технических средств подготовки и раздачи кормов на предприятиях по производству молока / В. М. Косолапов, А. В. Шевцов, А. Д. Милев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2016. – № 2(22). – С. 121-125.

40. Брусенков, А. В. Исследование процесса трения корнеклубнеплодов о различные поверхности / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, А. В. Прохоров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 2(33). – С. 68-71.

41. Иванов, Ю. А. Система технологий и машин для механизации и автоматизации производства продукции животноводства и птицеводства на период до 2020 года / Ю. А. Иванов, Н. М. Морозов, П. И. Гриднев [и др.]. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2013. – 224 с.

42. Брусенков, А. В. Технологии и средства приготовления корнеклубнеплодов для скармливания крупному рогатому скоту

/ А. В. Брусенков, В. П. Капустин // – Тамбов: ТГТУ, 2019. – 140 с.

43. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2030 года. Распоряжение правительства РФ № 1455-р от 7 июля 2017 г. – 39 с.

44. Морозов, Н. М. Направления развития инновационной техники для приготовления и раздачи кормов на фермах крупного рогатого скота / Н. М. Морозов, И. И. Хусаинов // Вестник ВНИИМЖ. – 2012. – № 1(5). – С. 80-88.

45. Морозов, Н. М. Анализ развития животноводства в России / Н. М. Морозов, А. Н. Рассказов // Вестник ВНИИМЖ. – 2016. – № 2(22). – С. 126 – 133.

46. Новая техника для агропромышленного комплекса России (по материалам 21-й Российской агропромышленной выставки «Золотая осень»): каталог. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2020. – 172 с.

47. Бычков, А. А. Параметры процесса сухой очистки корнеплодов шнековым сепаратором: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Бычков Александр Владимирович. – Ростов н/Д, 2014. – 131 с.

48. Кукта, Г. М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г. М. Кукта. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.

49. Кулаковский, И. В. Машины и оборудование для приготовления кормов: справочник / И. В. Кулаковский, Ч. С. Кирпичников, Е. И. Резник. – М.: Россельхозиздат, 1987. – Ч. 1. – 285 с.

50. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Л.: Колос, Ленингр. отд-ние, 1978. – 560 с.

51. НТП АПК 1.10.16.001 – 02. Нормы технологического проектирования кормоцехов для животноводческих ферм и комплексов. – М., 2002. – 32 с.

52. Морозов, Н. М. Повышение эффективности производства продукции животноводства: рекомендации / Н. М. Морозов, И. И. Хусаинов, В. Н. Базонов, Л. М. Цой, Е. Л. Ревякин. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 168 с.

53. ГОСТ 7194-81. Картофель свежий. Правила приемки и методы определения качества: Взамен ГОСТ 7194-69: дата введения 01.06.82. М.: Издво стандартов, 1981. Стандартинформ, 2010. – 13 с.
54. Кудло, К. К. Урожай и химический состав картофеля и сахарной свеклы, выращенных на дерново-подзолистой и торфяно-болотной почвах: дис. ...канд. биол. наук: / К. К. Кудло. – Минск, 1966. – 32 с.
55. Езепчук, А. Л. Кормовые корнеплоды при кормлении коров / А. Л. Езепчук, В. В. Тумурхонов, Н. Т. Татаров, Т. М. Тохметов // Сельское, лесное и водное хозяйство. – 2011. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://agro.s nauka.ru/2011/11/50> (дата обращения: 03.06.2023).
56. Назирова, Р. М. Изменение химического состава клубней картофеля в процессе хранения / Р. М. Назирова, Н. Б. Усмонов, Р. И. Сулаймонов // Проблемы современной науки и образования. – 2020. – № 6-2(151). – С. 19-22.
57. Спицын, И. А. Сельскохозяйственная техника и технологии / И. А. Спицын, А. Н. Орлов, В. В. Ляшенко [и др.]; под общ. ред. И. А. Спицына. – М.: КолосС, 2006. – 647 с.
58. Зиганшин, Б. Г. Современные энергосберегающие технологии в сельском хозяйстве / Б. Г. Зиганшин, Ю. Х. Шогенов, И. Х. Гайфуллин [и др.] // – Казань: КГАУ, 2018. – 276 с.
59. Файзрахманов, Д. И. Концепция развития органического сельского хозяйства Республики Татарстан / Д. И. Файзрахманов, Р. И. Сафин, А. Р. Валиев [и др.] // – Казань: Казанский ГАУ, 2019. – 88 с.
60. Зиганшин, Б. Г. Обоснование параметров измельчителя кормов / Б. Г. Зиганшин, П. В. Зайцев, Д. Т. Халиуллин [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. – 2023. – № 1(45). – С. 69-77.
61. 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: ЭйПиСиПаблишинг, 2020. – С. 681-685.

62. Морозова, Н.Ю. Обоснование технологического процесса измельчения стебельных кормов рабочим органом молотко-восегментного типа / Н.Ю. Морозова, В.Ю. Фролов // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. 2018. – № 2-2. – С. 149-151.
63. Пат. 2795898 Российская Федерация, МПК B02C 7/18 (2023.02). Устройство для измельчения зерна / Р. Р. Лукманов, И. Р. Нафиков, Б. М. Сабиров [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Казанский ГАУ. – № 2022128151: заявл. 28.10.2022: опубл. 15.05.2023, Бюл. №14. – 7 с.
64. Пат. 196834 Российская Федерация, МПК A01F 29/00 (2020.02). Измельчитель-смеситель кормов / Зиганшин Б. Г., Дмитриев А. В., Халиуллин Д. Т., Кашапов И. И., Омар И. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Казанский ГАУ. – № 2019133125; заявл. 17.10.2019: опубл. 17.03.2020, Бюл. №8. – 5 с.
65. Хайдаров, Р. Р. Универсальный измельчитель корнеклубнеплодов ИКХ-5,5 / Р. Р. Хайдаров, Б. Г. Зиганшин // Вестник Казанского ГАУ. – Казань, 2012. – № 1(23). – С. 109 - 111.
66. Фролов, В.Ю. Ресурсосберегающие технологии приготовления и раздачи кормов на животноводческих фермах малых форм хозяйствования / В.Ю. Фролов, Д.П. Сысоев, Н.Ю. Сарбатова, А.Ю. Марченко // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 3 (189). – С. 15-19.
67. Фролов, В.Ю. Классификация кормораздатчиков / В.Ю. Фролов, М.И. Туманова // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 7. – С. 18-19.
68. Alatoom, Mohammad. The mobile feed preparation shop with a continuous-running fodder mixer / Mohammad Alatoom. Materiały IX Miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania swiatowej nauki – 2013» Volume 27. – Przemysl, 2013. – P. 14-15.
69. Смирнов, Р. А. Совершенствование конструкции и обоснование основных параметров измельчителя корнеклубнеплодов: дис. канд. ...техн. наук: 05.20.01 / Смирнов Роман Александрович, – Чебоксары, 2018. – 159 с.
70. Дегтерев, Г.П. Технологии и средства механизации животноводства

- / Г.П. Дегтерев. – М.: Столичная ярмарка, 2010. – 384 с.
71. Князев, А.Ф. Механизация и автоматизация животноводства / А.Ф. Князев, Е.И. Резник. – М.: КолосС, 2004. – 375 с.
72. Брусенков, А. В. Обзор и анализ машин для измельчения корнеклубнеплодов / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, Е. И. Сысоев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016. – Т. 4, № 1(21). – С. 125-139. – DOI 10.12737/19270.
73. Белянчиков, Н. Н. Механизация животноводства / Н.Н Белянчиков, А.И. Смирнов. – М.: Колос, 1983. – 360 с.
74. Тимофеев, М. Н. Анализ технических средств для измельчения кормов и их классификация / М. Н. Тимофеев, В. Ю. Фролов, Н. Ю. Морозова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 399-424. – DOI 10.21515/1990-4665-132-032.
75. Кирсанов, В.В. Механизация и технология животноводства: учебник для студ. вузов, обуч. По спец. «Механизация сельского хозяйства» / [В.В. Кирсанов и др.]. – М.: КолосС, 2007. – 584 с.
76. Рошин, П.М. Механизация в животноводстве. – М.: Агропромиздат, 1988. – 287 с.
77. Тимофеев, М. Н. Анализ технических средств для измельчения кормов и их классификация / М. Н. Тимофеев, В. Ю. Фролов, Н. Ю. Морозова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского ГАУ. – 2017. – № 132. – С. 399-424.
78. Борисова, М. Л. Методические указания к практическим занятиям по курсу "Основы механизации животноводства" для студентов 1 курса инженерного факультета, обучающихся по направлению 35.03.06 "Агроинженерия" / М. Л. Борисова. – Ярославль: ФГБОУ ВПО Ярославская ГСХА, 2015. – 74 с.
79. Таранов, Д. М. Многоскоростной энергосберегающий электропривод универсального измельчителя кормов МУИК-10: дис. ...канд. техн. наук:

05.20.02 / Таранов, Дмитрий Михайлович. – Зерноград, 1999. – 172 с.

80. Вертий, А. А. Повышение эффективности процесса измельчения грубых стебельчатых кормов: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Вертий Александр Анатольевич. – Воронеж, 2019. – 158 с.

81. Вольвак, С.Ф. Анализ математической модели технологического процесса измельчения стебельчатых кормов // С.Ф. Вольвак, В.И. Шаповалов / Известия Международной академии аграрного образования. – Выпуск 25 (2015). – Том 1. – Санкт-Петербург: СПб РО МААО, 2015. – С. 90-93.

82. Горячkin, В.П. Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин / В.П. Горячкин // собр. соч. – Т. 2. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 530 с.

83. Демченко, В.Н. Повышение эффективности процесса измельчения грубых и стебельчатых кормов // В.Н. Демченко, А.А. Вертий // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип.1. – Т. 3. – С. 74-79.

84. Крамаренко, Л.П. Сопротивление растений перерезанию / Л.П. Крамаренко // Теория, конструкция и производство сельскохозяйственных машин, Т. 2, под общ. ред. В.П. Гарячкина. – М.: Сельхозгиз, 1936. – 536 с.

85. Мухин, В.А. Механизация приготовления кормов / В.А. Мухин // Саратов: Сарат. гос. с.-х. акад., 1994. – 159 с.

86. Резник, Е.И. Механизация приготовления кормов на животноводческих фермах и комплексах / Е.И. Резник, Е.В. Алябьев. – М.: ВНИИТЭИСХ, 1983. – 60 с.

87. Вольвак, С.Ф. Обґрунтування технологічного процесу і параметрів робочих органів гнучкого універсального малогабаритного кормоприготувального агрегату у варіанті подрібнення грубих кормів: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Вольвак Сергій Федорович. – Луганськ: ЛСГІ, 1998. – 244 с.

88. Андреев, С.Е. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава / С.Е. Андреев, В.В. Товаров, В.А. Петров. - М.: Металлургиздат, 1959. – 437 с.
89. Коваленко, В.П. Механизация технологических процессов в животноводстве / В.П. Коваленко, И.М. Петренко. – Краснодар. Агропромполиграфист, 2013. – 348 с.
90. Горячкин, В. П. Теория соломорезки и силосорезки. Собрание сочинений / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1968. – Т.1. – 508 с.
91. Шешунова, Е. В. Механизация животноводства: Учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы для обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» (профиль «Машины и оборудование в агробизнесе») / Е. В. Шешунова, М. Л. Борисова. – Ярославль: ФГБОУ ВПО Ярославская ГСХА, 2019. – 68 с.
92. Мельников, С. В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов. - 2-е изд., перераб., доп. / С.В. Мельников. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. Отд-ние, 1985. – 640 с.
93. Ряднов, А. И. Выбор частных показателей комплексной оценки эффективности использования измельчителя корнеклубнеплодов / А. И. Ряднов, О. А. Федорова, А. К. Мамахай // Электротехнологии и электрооборудование в АПК, 2021. – Т. 68. – № 4(45). – С. 45-50.
94. Волхонов, М. С. Определение оптимальных режимов работы центробежного измельчителя фуражного зерна / М. С. Волхонов, А. М. Абалихин, Д. В. Барабанов [и др.]. // Аграрная наука. 2023. – № 6. – С. 111-115.
95. Ivanov, A. S. A Universal Root Crop Chopper for Cattle / A. S. Ivanov, N. V. Sheludyakov // The world of science without borders, 2021. – P. 79-82.
96. Морозова Н.Ю., Фролов В.Ю. Обоснование технологического процесса измельчения стебельных кормов рабочим органом молотково-сегментного типа // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации, 2018. – № 2-2. – С. 149-151.

97. Ибрагимов, А.З. Анализ процесса регулирования режимов измельчителя зерна на ступенчато-роторном измельчителе / Ибрагимов А.З., Абдиева Н. Ф.// Аграрный научный журнал, 2023. – № 4. – С. 106-111.
98. Алешкин, А. В. Изучение условий защемления клубней в измельчителе корнеклубнеплодов / А. В. Алешкин, С. Ю. Булатов, П. А. Савиных [и др.]. // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 10(65). – С. 54-61.
99. Савиных, П. А. Оптимизация рабочего процесса измельчителя корнеклубнеплодов / П. А. Савиных, С. Ю. Булатов, Р. А. Смирнов // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки, 2015. – Т. 1. – № 3(3). – С. 36-42.
100. Туманова, М. И. Параметры измельчителя стебельных кормов с дисковым рабочим органом для малых ферм КРС: дис. ... кан. техн. наук: 05.20.01 / Туманова Марина Ивановна. – Краснодар, 2020. – 179 с.
101. Пополднев, Р. С. Определение энергоемкости 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.
102. Халиуллин, Д. Т. Усовершенствованный измельчитель кормов / Д. Т. Халиуллин, Ю. Х. Шогенов, Б. Г. Зиганшин [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 11(317). – С. 28-31. – DOI 10.33267/2072-9642-2023-11-28-31.
103. Пат. 2760435 Российская Федерация, МПК A01F 29/02 (2021.08). Измельчитель-смеситель кормов / Зиганшин Б. Г., Дмитриев А. В., Халиуллин Д. Т. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Казанский ГАУ". – № 2021106282: заявл. 10.03.202: опубл. 25.11.2021, Бюл. № 33. – 7 с.
104. Пат. 2788535 Российская Федерация, МПК A01F 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.
105. Пат. 230912 Российская Федерация, МПК A01F 29/00 (2024.08).

Измельчитель-смеситель кормов / Халиуллин Д. Т., Гайфуллин И. Х., Зиганшин Б. Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "Казанский ГАУ". – № 2024132912: заявл. 01.11.2024: опубл. 24.12.2024, Бюл. 36. – 7 с.

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. Алешкин В.Р., Рощин П.М. Механизация животноводства.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1993. – 319 с.

111. Алешкин, А.В. Определение усилия со стороны ножа при резании с

качением корнеклубнеплодов в измельчителе с горизонтальным качающимся диском / А.В. Алешкин, П.А. Савиных, С.Ю. Булатов, Р.А. Смирнов // Молочнохозяйственный вестник. – 2016. – № 3 (23). – С. 62-75.

112. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – Л.: Колос, 1978. – 560 с.

113. ГОСТ ISO 6498-2014. Корма, комбикорма. Подготовка проб для испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 18 с.

114. ГОСТ 441-49 Машины сельскохозяйственные. Ножи кормообрабатывающих машин. – М.: Стандатгиз, 1949. – 5 с.

115. Ульянова, Н.С. Методические рекомендации «Зоотехнический анализ кормов», Н. С. Ульянова. – Смоленск: ФГБОУ ВО Смоленская ГСХА, 2023 – 65 с.

116. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. - 2-е изд., перераб, и доп. – Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.

117. ГОСТ Р 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения: введ. впервые: дата введения 2012-12-13. Переиздание: 2020-07-22. – М.: Изд-во стандартов, 2020. – 20 с.

118. Кушнир, В. Г. Методика исследований физико-механических свойств зернового материала / В. Г. Кушнир, Н. В. Гаврилов, Т. В. Шкотова // 3i: Intellect, Idea, Innovation - интеллект, идея, инновация. – 2019. – № 4. – С. 73-78.

119. Ведищев, С. М. Приготовление комбикормов в условиях КФХ / С. М. Ведищев, А. И. Завражнов, А. В. Прохоров [и др.] // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию П. В. Сенина. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2024. – С. 13-22.

120. Брусенков, А. В. Исследование коэффициентов трения корне-

клубнеплодов о поверхности / А. В. Брусенков, С. М. Ведищев, А. Н. Зазуля [и др.] // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для АПК: Сборник научных докладов XX Международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2019. – С. 129-133.

121. Ведищев, С. М. Исследование усилий резания корнеклубнеплодов / С. М. Ведищев, А. И. Завражнов, А. В. Брусенков [и др.] // Современная наука: теория, методология, практика: Материалы III-ей Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2021. – С. 303-306.

122. Заводнов, С. В. Исследование взаимодействия клубней картофеля с рабочими органами сельскохозяйственных машин: дис. ... кан. техн. наук: 05.20.01 / Заводнов Сергей Викторович. – Москва, 2002. – 16 с.

123. Плахов, С. А. Модернизация оборудования для послеуборочной доработки картофеля / С. А. Плахов, В. М. Алакин // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва: Московский государственный областной университет, 2019. – С. 364-368.

124. Плахов, С. А. Результаты разработки виброротационного сепаратора почвенных и растительных примесей / С. А. Плахов, В. М. Алакин // Роль аграрной науки в развитии АПК РФ: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 105-летию ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. Том Часть 1. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2017. – С. 128-132.

125. Алакин, В. М. Универсальная сортировка для картофеля / В. М. Алакин, С. А. Плахов // Картофель и овощи. – 2016. – № 8. – С. 23-25.

126. ГОСТ Р 54951-2012 (ИСО 6496:1999). Корма для животных.

Определение содержания влаги: официальное издание. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 15 с.

127. Сафарханов, М. М. Технология производства томата сушёного / М. М. Сафарханов // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства: Материалы международной научно-практической конференции. Том Выпуск XXV. – Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2023. – С. 199-202.

128. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для вузов. – М.: Высш. Школа, 2001. – 416 с.

129. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: справочник / И. Н. Бронштейн, К. А. Семеняев. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 608 с.

130. Бареян, А.Г. Особенности резания лезвием и анализ силового воздействия на контакте лезвия / А.Г. Бареян // Вестник СевКав.: сер. «Естественнонаучная», 2003. – №1(6). – С.27-30.

131. Горюшинский, В.С. Совершенствование резания корнеплодов с обоснованием параметров измельчителя: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 05.20.01 / Горюшинский Валентин Сергеевич. – Пенза, 2004. – 13 с.

132. Курдюмов, В.И. Анализ факторов, влияющих на энергоемкость резания / В.И. Курдюмов, П.Н. Аюгин // Нива Поволжья. – Пенза: Пензенская ГСХА, 2008. – №3(8). – С.57-59.

133. Лапшенкова, А.С. Результаты экспериментальных исследований резания корнеклубнеплодов картофеля / А.С. Лапшенкова, А. Мамедова, Н.М. Антонов, Н.И. Лебедь // Наука и молодёжь: новые идеи и решения / Материалы X Международной научно-практической конференции молодых исследователей. Часть III. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ ИПК «Нива», 2016. – С. 470-472.

134. Адлер, Ю. П. Введение в планирование экспериментов: учебное пособие / Ю. П. Адлер. – Москва: МИСИС, 2014. – 36 с.

135. СТО АИСТ 1. 14. 1-2020. Машины для животноводства. Показатели

назначения и надежности. Общие требования: СТО аист 1. 14. 1-2020: [взамен СТО аист 1. 14-2012 (в части значений показателей условий испытаний, назначения и надежности сельскохозяйственных тракторов): введ. 03. 02. 2020]: издание официальное. – Москва: ФГБНУ "Росинформагротех", 2020. – III, – 9 с.

136. ГОСТ Р 52812-2007. Смеси кормовые. Технические условия: официальное издание. – Введ. 2008-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 11 с.

137. Смирнов, Р. А. Состояние проблемы измельчения корнеклубнеплодов / Р. А. Смирнов, А. И. Котин // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 10(53). – С. 37-46.

138. Ряднов, А. И. Выбор частных показателей комплексной оценки эффективности использования измельчителя корнеклубнеплодов / А. И. Ряднов, О. А. Федорова, А. К. Мамахай // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68, № 4(45). – С. 45-50. – DOI 10.22314/2658-4859-2021-68-4-45-50.

139. ГОСТ 34631-2019. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки. – Введ. 2021-03-15. – М.: Стандартинформ, 2020. – 13 с.

140. Гордеев, А. С. Энергосбережение в сельском хозяйстве: учебное пособие / А. С. Гордеев, Д. Д. Огородников, И. В. Юдаев. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 384 с.

141. ГОСТ 34393-2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. – Введ. 2019-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2019. – IV, 23 с.

142. Булатов, С. Ю. Технико-экономическая эффективность внедренных в производство кормоприготовительных машин / С. Ю. Булатов, К. Е. Миронов, В. Н. Нечаев, П. А. Савиных // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 2(30). – С. 83-87.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

**ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА  
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РЕЗАНИЕМ**

**A1 – Код программы расчета на языке C# в среде разработки  
приложений Visual Studio**

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace Измельчитель
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        Double delta, E, Beta, Mu, f, sigma, hsj, h, alfa, fs, k0, D, v0, Omega, ro, R;
        Double[] r, tay,q,A,u;
        double q0, S, Asum, Wrez, Mrez, Wxx, Wm, Q, W, d0, n, dk, PU;
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
            this.WindowState = FormWindowState.Maximized;
            //Таблица_1
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[0].Cells[0].Value = " delta = ";
            dataGridView1.Rows[0].Cells[1].Value = 20.0/1000000;//м
            dataGridView1.Rows[0].Cells[2].Value = " Острота лезвия ножа, м";
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[1].Cells[0].Value = " E = ";
            dataGridView1.Rows[1].Cells[2].Value = " Модуль упругости Юнга, Па ";
            dataGridView1.Rows[1].Cells[1].Value = 6000000;
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[2].Cells[0].Value = " Beta = ";
            dataGridView1.Rows[2].Cells[2].Value = " Beta - угол заточки лезвия,
градус";
            dataGridView1.Rows[2].Cells[1].Value = 28;
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[3].Cells[0].Value = " Mu ";
            dataGridView1.Rows[3].Cells[2].Value = " Mu - коэффициент Пуассона ";
            dataGridView1.Rows[3].Cells[1].Value = 0.3;
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[4].Cells[0].Value = " f ";
            dataGridView1.Rows[4].Cells[2].Value = " f - коэффициент трения ";
            dataGridView1.Rows[4].Cells[1].Value = 0.2;
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[5].Cells[0].Value = " sigma = ";
            dataGridView1.Rows[5].Cells[2].Value = " sigma - предел прочности при
разрушении, Па ";
            dataGridView1.Rows[5].Cells[1].Value = 50000000;
            dataGridView1.Rows.Add();
            dataGridView1.Rows[6].Cells[0].Value = " hsj = ";

```

```

        dataGridView1.Rows[6].Cells[2].Value = " hsj - высота сжатия материала до
начала резания, м ";
        dataGridView1.Rows[6].Cells[1].Value = 0.01;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[7].Cells[0].Value = " h ";
        dataGridView1.Rows[7].Cells[2].Value = " h - высота материала h > hsj, м";
        dataGridView1.Rows[7].Cells[1].Value = 0.05;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[8].Cells[0].Value = " alfa ";
        dataGridView1.Rows[8].Cells[2].Value = " alfa - коэффициент
пропорциональности при убывании удельной силы резания от угла тая, (Н/м)/градус";
        dataGridView1.Rows[8].Cells[1].Value = 0.6;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[9].Cells[0].Value = " fs ";
        dataGridView1.Rows[9].Cells[2].Value = " fs - коэффициент скользящего
резания ";
        dataGridView1.Rows[9].Cells[1].Value = 0.45;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[10].Cells[0].Value = " k0 ";
        dataGridView1.Rows[10].Cells[2].Value = " k0 - коэффициент заполнения сечения
горловины материалом ";
        dataGridView1.Rows[10].Cells[1].Value = 0.07;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[11].Cells[0].Value = " D ";
        dataGridView1.Rows[11].Cells[2].Value = " D - диаметр загрузочной горловины,
м ";
        dataGridView1.Rows[11].Cells[1].Value = 0.1;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[12].Cells[0].Value = " v0 ";
        dataGridView1.Rows[12].Cells[2].Value = " v0 - скорость подачи материала в
горловину, м/с ";
        dataGridView1.Rows[12].Cells[1].Value = 0.1;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[13].Cells[0].Value = " Omega ";
        dataGridView1.Rows[13].Cells[2].Value = " Omega - угловая скорость ротора с
ножами, рад/с";
        dataGridView1.Rows[13].Cells[1].Value = 156;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[14].Cells[0].Value = " ro ";
        dataGridView1.Rows[14].Cells[2].Value = " ro - плотность материала, кг/м^3";
        dataGridView1.Rows[14].Cells[1].Value = 300;
        dataGridView1.Rows.Add();
        dataGridView1.Rows[15].Cells[0].Value = " R ";
        dataGridView1.Rows[15].Cells[2].Value = " R - Радиус конца лопасти швырялки";
        dataGridView1.Rows[15].Cells[1].Value = 0.165;
//Таблица_2
        dataGridView2.Rows.Add();
        dataGridView2.Rows[0].Cells[0].Value = 1.3;
        dataGridView2.Rows[0].Cells[1].Value = 0.73;//м
        dataGridView2.Rows[0].Cells[2].Value = 24.2;
        dataGridView2.Rows.Add();
        dataGridView2.Rows[1].Cells[0].Value = 1.05;
        dataGridView2.Rows[1].Cells[1].Value = 0.138;//м
        dataGridView2.Rows[1].Cells[2].Value = 12.5;
        dataGridView2.Rows.Add();
        dataGridView2.Rows[2].Cells[0].Value = 1.05;
        dataGridView2.Rows[2].Cells[1].Value = 0.160;//м
        dataGridView2.Rows[2].Cells[2].Value = 10.8;
        dataGridView2.Rows.Add();
        dataGridView2.Rows[3].Cells[0].Value = 1.05;
        dataGridView2.Rows[3].Cells[1].Value = 0.174;//м
        dataGridView2.Rows[3].Cells[2].Value = 9.91;
        dataGridView2.Rows.Add();
        dataGridView2.Rows[4].Cells[0].Value = 1.05;

```

```

dataGridView2.Rows[4].Cells[1].Value = 0.188;//м
dataGridView2.Rows[4].Cells[2].Value = 9.15;
dataGridView2.Rows.Add();
dataGridView2.Rows[5].Cells[0].Value = 1.05;
dataGridView2.Rows[5].Cells[1].Value = 0.195;//м
dataGridView2.Rows[5].Cells[2].Value = 8.82;
dataGridView2.Rows.Add();
dataGridView2.Rows[6].Cells[0].Value = 1.05;
dataGridView2.Rows[6].Cells[1].Value = 0.202;//м
dataGridView2.Rows[6].Cells[2].Value = 8.53;
dataGridView2.Rows.Add();
dataGridView2.Rows[7].Cells[0].Value = 1.05;
dataGridView2.Rows[7].Cells[1].Value = 0.202;//м
dataGridView2.Rows[7].Cells[2].Value = 8.53;
dataGridView2.Rows.Add();
dataGridView2.Rows[8].Cells[0].Value = 1.05;
dataGridView2.Rows[8].Cells[1].Value = 0.202;//м
dataGridView2.Rows[8].Cells[2].Value = 8.53;
// dataGridView2.Rows.Add();
dataGridView1.Rows.Add();
}

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    //Вычисление
    r = new double[9];
    tay = new double[9];
    q= new double[9];
    A = new double[9];
    u = new double[9];
    // delta, E, Beta, Mu, f, sigma, hsj, h, alfa, fs, k0, D, v0, Omega

    delta = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[0].Cells[1].Value);
    E = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[1].Cells[1].Value);
    Beta = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[2].Cells[1].Value);
    Mu = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[3].Cells[1].Value);
    f = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[4].Cells[1].Value);
    sigma = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[5].Cells[1].Value);
    hsj = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[6].Cells[1].Value);
    h = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[7].Cells[1].Value);
    alfa = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[8].Cells[1].Value);
    fs = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[9].Cells[1].Value);
    k0 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[1].Value);
    D = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[1].Value);
    v0 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[12].Cells[1].Value);
    Omega = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[13].Cells[1].Value);
    ro = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[14].Cells[1].Value);
    R = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[15].Cells[1].Value);
    for (int i = 0; i < 9; i++)
    {
        r[i] = Convert.ToDouble(dataGridView2.Rows[i].Cells[1].Value);
        tay[i] = Convert.ToDouble(dataGridView2.Rows[i].Cells[2].Value);
        u[i] = Convert.ToDouble(dataGridView2.Rows[i].Cells[0].Value);
    }
}

```

```

S = Math.PI * D * D / 4;

q0 = delta * sigma + E / 2 * hsj * hsj / h * Math.Tan(Beta / 180 * Math.PI) +
f * Math.Sin(Beta / 180 * Math.PI) * Math.Sin(Beta / 180 * Math.PI) + Mu * (f +
Math.Cos(Beta / 180 * Math.PI) * Math.Cos(Beta / 180 * Math.PI));

Asum = 0;
PU = 1.0;
q[0] = q0 * (1 - alfa * tay[0] / 90);
A[0] = PU * q[0] * (1 + fs * Math.Tan(tay[0] * Math.PI / 180)) * k0 * S;
for (int i = 1; i < 9; i++)
{
    PU *= u[i - 1];
    q[i] = q0 * (1 - alfa * tay[i] / 90);
    A[i] = PU * q[i] * (1 + fs * Math.Tan(tay[i] * Math.PI / 180)) * k0 * S;
    if(checkBox1.Checked)
        A[i]=Math.Pow(2,i)*q[i]*(1+fs*Math.Tan(tay[i]*Math.PI/180))*k0*S;
    Asum += 2*A[i];
}

for (int i = 0; i < 9; i++)
{
    dataGridView2.Rows[i].Cells[3].Value = q[i];
    dataGridView2.Rows[i].Cells[4].Value = A[i];
}

Wrez = Omega / (2 * Math.PI) * Asum;
Mrez = 1.0 / (2 * Math.PI) * Asum;
Q = k0 * ro * v0 * S;
Wm = Q * R * R * Omega * Omega;
Wxx = 0.2 * (Wm + Wrez);
W = Wrez + Wm + Wxx;
d0 = v0 * Math.PI / Omega;
dk = d0 / (PU*u[8]);
if (checkBox1.Checked)
    dk = d0 / Math.Pow(2, 8);
    dataGridview1.Rows[16].Cells[2].Value = " Расчетные величины: ";
    dataGridview1.Rows[17].Cells[0].Value = " q0 ";
    dataGridview1.Rows[17].Cells[2].Value = " удельная линейная сила резания q0,
H/m";
    dataGridview1.Rows[17].Cells[1].Value = q0;

    dataGridview1.Rows[18].Cells[0].Value = " Q ";
    dataGridview1.Rows[18].Cells[2].Value = " Подача материала ";
    dataGridview1.Rows[18].Cells[1].Value = Q;

    dataGridview1.Rows[19].Cells[0].Value = " Mrez ";
    dataGridview1.Rows[19].Cells[2].Value = " Момент резания ";
    dataGridview1.Rows[19].Cells[1].Value = Mrez;

    dataGridview1.Rows[20].Cells[0].Value = " Wrez ";
    dataGridview1.Rows[20].Cells[2].Value = " Мощность резания ";
    dataGridview1.Rows[20].Cells[1].Value = Wrez;

    dataGridview1.Rows[21].Cells[0].Value = " Wm ";
    dataGridview1.Rows[21].Cells[2].Value = " Мощность на разгон материала ";
    dataGridview1.Rows[21].Cells[1].Value = Wm;

    dataGridview1.Rows[22].Cells[0].Value = " Wxx ";
    dataGridview1.Rows[22].Cells[2].Value = " Мощность на холостой ход ";
    dataGridview1.Rows[22].Cells[1].Value = Wxx;

```

```
dataGridView1.Rows[23].Cells[0].Value = " W ";
dataGridView1.Rows[23].Cells[2].Value = " Мощность на привод ротора ";
dataGridView1.Rows[23].Cells[1].Value = W;

dataGridView1.Rows[24].Cells[0].Value = " d0 ";
dataGridView1.Rows[24].Cells[2].Value = " размер отрезаемый первым ножом ";
dataGridView1.Rows[24].Cells[1].Value = d0;

dataGridView1.Rows[25].Cells[0].Value = " dk ";
dataGridView1.Rows[25].Cells[2].Value = " размер отрезаемый последним ножом
";
dataGridView1.Rows[25].Cells[1].Value = dk;
}

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Close();
}
}
```

## **A2 – Исходные данные для расчета пропускной способности измельчителя-смесителя и энергоемкости процесса измельчения**

Обозначение	Значение	Комментарий
delta =	2E-05	Острота лезвия ножа, м
E =	6000000	Модуль упругости Юнга, Па
Beta =	28	Beta - угол заточки лезвия, градус
Mu	0,3	Mu - коэффициент Пуассона
f	0,2	f - коэффициент трения
sigma =	5000000	sigma - предел прочности при разрушении, Па
hsj =	0,01	hsj - высота сжатия материала до начала резания, м
h	0,05	h - высота материала $h > h_{sj}$ , м
alfa	0,6	alfa - коэффициент пропорциональности при убывании удельной силы ре...
fs	0,45	fs - коэффициент скользящего резания
k0	0,07	k0 - коэффициент заполнения сечения горловины материалом
D	0,1	D - диаметр загрузочной горловины, м
v0	0,1	v0 - скорость подачи материала в горловину, м/с
Omega	156	Omega - угловая скорость ротора с ножами, рад/с
ro	300	ro - плотность материала, кг/м^3
R	0,165	R - Радиус конца лопасти швирялки

### A3 – Результаты численного расчета пропускной способности измельчителя-смесителя и энергоемкости процесса измельчения

Form1

Обозначение	Значение	Комментарий
delta =	2E-05	Острота лезвия ножа, м
E =	6000000	Модуль упругости Юнга, Па
Beta =	28	Beta – угол заточки лезвия, градус
Mu	0.3	Mu – коэффициент Пуассона
f	0.2	f – коэффициент трения
sigma =	5000000	sigma – предел прочности при разрушении, Па
hsj =	0.01	hsj – высота сжатия материала до начала резания, м
h	0.05	h – высота материала h > hsj, м
alfa	0.6	alfa – коэффициент пропорциональности при убывании удельной силы ре...
fs	0.45	fs – коэффициент скользящего резания
k0	0.07	k0 – коэффициент заполнения сечения горловины материалом
D	0.1	D – диаметр загрузочной горловины, м
v0	0.1	v0 – скорость подачи материала в горловину, м/с
Omega	156	Omega – угловая скорость ротора с ножами, рад/с
ro	300	ro – плотность материала, кг/м^3
R	0,165	R – Радиус конца лопасти швырялки
		Расчетные величины:
q0	4190,59454961405	удельная линейная сила резания q0, Н/м
Q	0,0164933614313464	Подача материала
Mrez	9,16873171597142	Момент резания
Wrez	1430,32214769154	Мощность резания
Wm	10,9276370322711	Мощность на разгон материала
Wxx	288,249956944763	Мощность на холостой ход
W	1729,49974166858	Мощность на привод ротора
d0	0,00201384144460884	размер отрезаемый первым ножом
dk	0,0010484978143046	размер отрезаемый последним ножом

**A4 – Результаты численного расчета удельной работы на каждом ряду ножей измельчителя-смесителя**

Средние характеристики рядов ножей

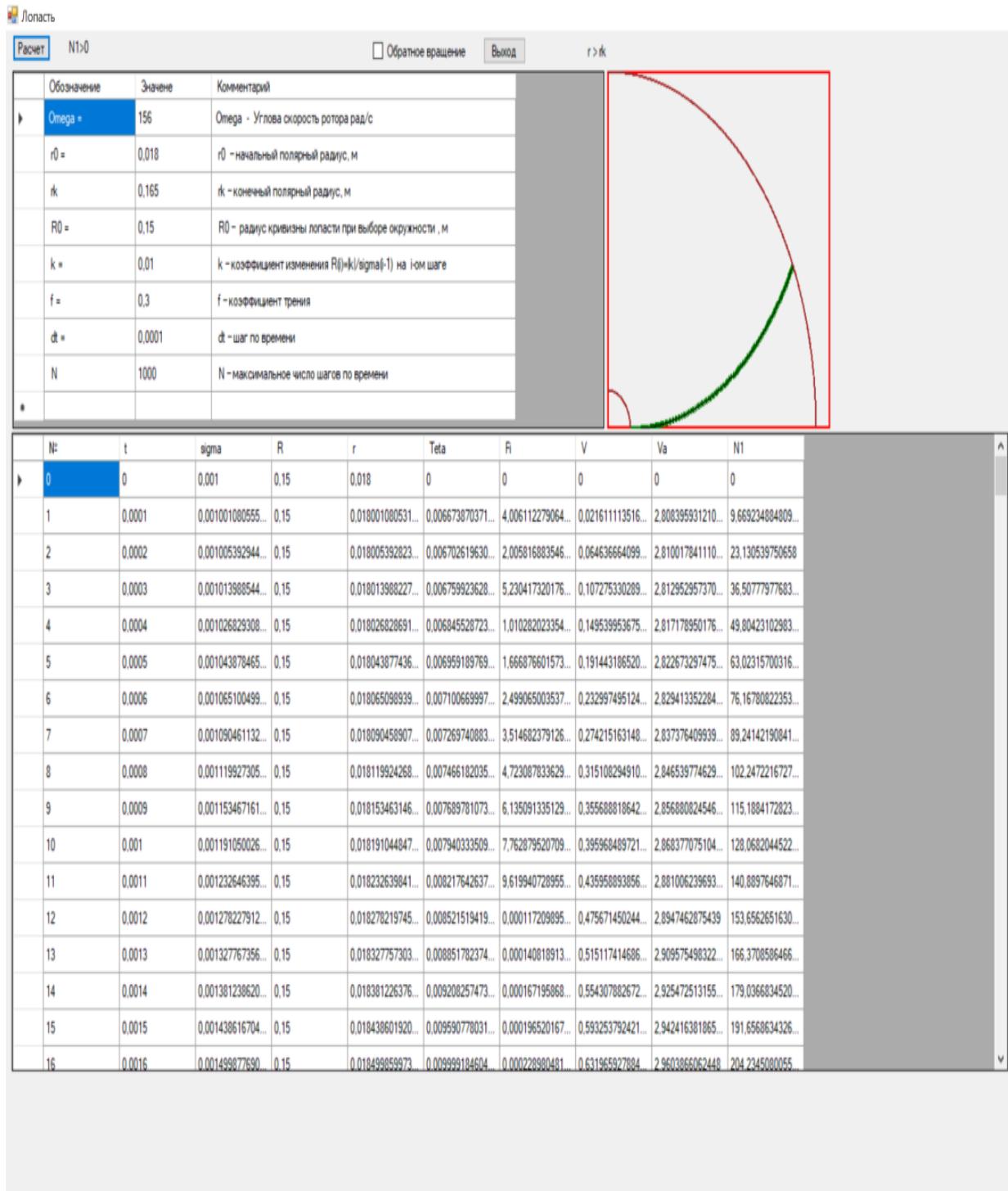
Степень изм. на  
каждом ноже 2

и, ст. изм.	г, м	тай, градус	q[i], Н/м	A[i] , Дж
▶ 1,3	0,73	24,2	3514,51196227631	2,32296895058314
1,05	0,138	12,5	3841,37833714621	3,01937672036868
1,05	0,16	10,8	3888,87174204183	3,16891700616653
1,05	0,174	9,91	3913,73593636954	3,32636007666931
1,05	0,188	9,15	3934,96828208759	3,49164494916634
1,05	0,195	8,82	3944,18759009674	3,66571405994289
1,05	0,202	8,53	3952,28940622599	3,84850353348701
1,05	0,202	8,53	3952,28940622599	4,04092871016136
*				

**Вычисление**

**Выход**

## A5 – Экранная форма программы с таблицей численного решения дифференциальных уравнений движения частиц по лопасти швырялки



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## ПОКАЗАНИЯ ПРИБОРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКТА

**Б1 – Показания приборов измерительного комплекса К-50 при определении удельной энергоемкости измельчителя-смесителя с 7 рядами ножей и лопастью штырьлки против направления вращения**

800 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{xx}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	26,9	77	51,5	57	4,5	7	7,42
2	26,9	77	51	55	4	9	5,24
3	26,9	77	52	56	5	12	6,00
<b>среднее</b>	<b>26,9</b>	<b>77</b>	<b>51,5</b>	<b>56</b>	<b>4,5</b>	<b>9,33</b>	<b>6,22</b>

1000 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{xx}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	33,7	89	55	58	5	15	6,98
2	33,7	89	55	58	5	15	6,06
3	33,7	89	55	56	5	12	6,9
<b>среднее</b>	<b>33,7</b>	<b>89</b>	<b>55</b>	<b>57,33</b>	<b>5</b>	<b>14</b>	<b>6,65</b>

1200 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{xx}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	40,6	100	55	58	5	14	5,34
2	40,6	100	55	58	5	12	9,0
3	40,6	100	55	58	5	12	7,07
<b>среднее</b>	<b>40,6</b>	<b>100</b>	<b>55</b>	<b>58</b>	<b>5</b>	<b>12,67</b>	<b>7,14</b>

1400 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{xx}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	47,2	110	54	56	5,5	16	7,10
2	47,2	110	54	55	4	13	6,71
3	47,2	110	54	57	5	12	7,91
<b>среднее</b>	<b>47,2</b>	<b>110</b>	<b>54</b>	<b>56</b>	<b>4,83</b>	<b>13,67</b>	<b>7,24</b>

1500 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{xx}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{xx}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	50	116	55	58	5,5	12	12,22
2	50	116	56	58	6	18	12,25
3	50	117	57	59	7	15	14,93
<b>среднее</b>	<b>50</b>	<b>116,33</b>	<b>56</b>	<b>58,33</b>	<b>6,17</b>	<b>15</b>	<b>13,13</b>

**Б2 – Показания приборов измерительного комплекта К-50 при определении удельной энергоемкости измельчителя-смесителя с 7 рядами ножей и лопастью швырялки по направлению вращения**

800 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	27,2	77	52	55	3	10	7,02
2	27,2	78	52,5	56	3	8	7,98
3	27,2	77,5	52	55	3	9	8,8
<b>среднее</b>	<b>27,2</b>	<b>77,5</b>	<b>52,17</b>	<b>55,33</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>7,93</b>

1000 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	33,7	89,5	54,5	56	4,5	14	10,62
2	33,7	90	55,5	57	4	8	12
3	33,7	89	55,0	56	4	8	11,4
<b>среднее</b>	<b>33,7</b>	<b>89,5</b>	<b>55</b>	<b>56,33</b>	<b>4,17</b>	<b>10</b>	<b>11,34</b>

1200 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	40,6	98	49	53	4,5	13	12,22
2	40,6	99,5	53	55	5	15	12,25
3	40,6	99	54	56	5	15	14,93
<b>среднее</b>	<b>40,6</b>	<b>98,8</b>	<b>52</b>	<b>54,67</b>	<b>4,83</b>	<b>14,33</b>	<b>13,13</b>

1400 мин<sup>-1</sup>

Вес до 1,535

Вес после 1,530

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	47,2	110	54	56	5,5	16	8,2
2	47,2	110	54	55	4	14	16,87
3	47,2	110	54	57	5	17	14,6
<b>среднее</b>	<b>47,2</b>	<b>110</b>	<b>54</b>	<b>56</b>	<b>4,83</b>	<b>15,67</b>	<b>13,23</b>

1500 мин<sup>-1</sup>

Вес до 1,535

Вес после 1,530

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	50	116	55	58	5,5	17	10,2
2	50	116	56	58	6	18	16,87
3	50	117	57	59	7	15	14,6
<b>среднее</b>	<b>50</b>	<b>116,33</b>	<b>56</b>	<b>58,33</b>	<b>6,17</b>	<b>17</b>	<b>13,89</b>

**Б3 – Показания приборов измерительного комплекта К-50 при определении удельной энергоемкости измельчителя-смесителя с 8 рядами ножей и лопастью штырьлки против направления вращения**

800 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{пп}}$ , Гц	$U$ , В	$I$ , А		$W$ , Вт		$t$ , с
1	26,9	77	51	67	4	7	7,42
2	26,9	77	51	65	4	10	10,00
3	26,9	77	52	66	5	14	10,00
<b>среднее</b>	<b>26,9</b>	<b>77</b>	<b>51,33</b>	<b>66</b>	<b>4,33</b>	<b>10,33</b>	<b>9,14</b>

1000 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{пп}}$ , Гц	$U$ , В	$I$ , А		$W$ , Вт		$t$ , с
1	33,7	88	53	55	5	8	7,33
2	33,7	89	53	55	6	14	10,00
3	33,7	89	53	55	6	12	12,00
<b>среднее</b>	<b>33,63</b>	<b>88,67</b>	<b>53</b>	<b>55</b>	<b>5,67</b>	<b>11,33</b>	<b>9,78</b>

1200 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{пп}}$ , Гц	$U$ , В	$I$ , А		$W$ , Вт		$t$ , с
1	40,3	99	55	57	5	10	15,06
2	40,3	97	54	57	6	14	10,02
3	40,3	99	55	58	7	15	8,64
<b>среднее</b>	<b>40,3</b>	<b>98,33</b>	<b>54,67</b>	<b>57,33</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>11,24</b>

1400 мин<sup>-1</sup> ( $\Gamma_{\text{ц}} 47,2$ )

№ опыта	$f_{\text{пп}}$ , Гц	$U$ , В	$I$ , А		$P$ , Вт		$t$ , с
1	47,2	110	57	59	6	12	16,21
2	42,2	110	57	60	6	15	15,69
3	47,2	110	57	59	7	15	15,34
<b>среднее</b>	<b>47,2</b>	<b>110</b>	<b>57</b>	<b>59,33</b>	<b>6,33</b>	<b>14</b>	<b>15,75</b>

$f_{\text{пп}}$  – частота выходного напряжения частотного преобразователя, Гц

$U$  – величина выходного напряжения частотного преобразователя, В

$I_{\text{хх}}$  – сила тока без нагрузки, А

$I_{\text{нагр}}$  – сила тока при нагрузке, А

$W_{\text{хх}}$  – мощность без нагрузки, Вт

$W_{\text{нагр}}$  – потребляемая мощность при нагрузке, Вт

**Б4 – Показания приборов измерительного комплекта К-50 при определении удельной энергоемкости измельчителя-смесителя с 8 рядами ножей и лопастью швырялки по направлению вращения**

800 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	27	76	52	55	4	12	8,8
2	27	76	52	55	4	9	7,14
3	26,9	75	46	55	3,5	1,5	8,5
<b>среднее</b>	<b>26,96667</b>	<b>75,66667</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>3,833333</b>	<b>7,5</b>	<b>8,146667</b>

1000 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	33,7	89	53	53,5	5	7	11
2	33,7	86	47	55	4,5	10	12
3	33,7	89	53	55	5,5	10	13
<b>среднее</b>	<b>33,7</b>	<b>88</b>	<b>51</b>	<b>54,5</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>

1200 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	40,6	97	48	55	7	10	14,23
2	40,6	98	55	55	6,5	16	6,31
3	40,6	99	54,5	56	6,5	12	10,39
<b>среднее</b>	<b>40,6</b>	<b>98</b>	<b>52,5</b>	<b>55,33333</b>	<b>6,666667</b>	<b>12,66667</b>	<b>10,31</b>

1400 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	47,2	110	54	56	5,5	15	8,2
2	47,2	110	54	55	4	12	15,87
3	47,2	110	54	57	5	14	14,6
<b>среднее</b>	<b>47,2</b>	<b>110</b>	<b>54</b>	<b>56</b>	<b>4,83</b>	<b>13,67</b>	<b>12,23</b>

1500 мин<sup>-1</sup>

№ опыта	$f_{\text{чп}}, \text{Гц}$	$U_\phi, \text{В}$	$I_{\text{xx}}, \text{А}$	$I_{\text{нагр}}, \text{А}$	$W_{\text{xx}}, \text{Вт}$	$W_{\text{нагр.}}, \text{Вт}$	$t, \text{с}$
1	50	116	55	58	5,5	13	10,2
2	50	116	56	58	6	17	16,87
3	50	117	57	59	7	15	14,6
<b>среднее</b>	<b>50</b>	<b>116,33</b>	<b>56</b>	<b>58,33</b>	<b>6,17</b>	<b>15</b>	<b>15,89</b>

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ МАССЫ ДЛЯ КАЖДОЙ КОМБИНАЦИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

#### **B1 – Вес фракций измельченного продукта при использовании 7-ми рядов ножей и лопастью швырялки против направления вращения**

Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Размеры фракций, мм				
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30
800	15,42	75,73	196,3	367,3	301,8
1000	19,96	88,9	245,6	400,9	202,2
1200	34,4	153,4	340,3	325,8	102,6
1400	67,67	242,46	414,73	176,51	41,51
1500	81,37	279,2	381,45	150,42	48,33

\* средний размер исходных клубней картофеля 48 мм, общий вес 0,995 кг. Вес после измельчения 0,970 кг.

#### **B2 – Вес фракций измельченного продукта при использовании 8-ми рядов ножей и лопастью швырялки по направлению вращения**

Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Размеры фракций, мм				
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30
800	25,42	75,73	246,3	387,3	310,8
1000	57,61	215,78	336,54	232,67	78,71
1200	75,8	312,36	391,07	150,47	42,77
1400	87,67	378,05	314,73	126,51	39,51

\* средний размер исходных клубней картофеля 49 мм, общий вес 1,015 кг. Вес после измельчения 0,992 кг.

**B3 – Вес фракций измельченного продукта при использовании 7-ми рядов ножей и лопастью швырялки по направлению вращения**

Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Размеры фракций, мм				
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30
800	25,89	107,17	258,47	308,28	257,51
1000	87,94	158,75	350,45	328,18	108,88
1200	72,43	283,07	403,61	200,11	69,41
1400	97,67	373,05	344,73	156,51	44,51

\* средний размер исходных клубней картофеля 51 мм, общий вес 1,002 кг. Вес после измельчения 0,978 кг.

**B4 – Вес фракций измельченного продукта при использовании 8-ми рядов ножей и лопастью швырялки против направления вращения**

Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup>	Размеры фракций, мм				
	0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	20 - 30
800	46,9	147,69	305,7	279,6	190
1000	37,87	166,21	330,84	276,88	169,56
1200	54,79	220,14	378,93	220,55	47,89
1400	98,4	317,97	322,37	86,83	31,2

\* средний размер исходных клубней картофеля 52 мм, общий вес 1,005 кг. Вес после измельчения 0,985 кг.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и  
инновациям ФГБОУ ВО Казанского

ГАУ, д.т.н., профессор

  
М.Н. Калимуллин

«28» апреля 2025г.

об использовании (внедрении) научно-исследовательской работы в учебном  
процессе

Мы, директор Института механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанского ГАУ, к.т.н., доцент В.М. Медведев и заведующий кафедрой «Машины и оборудование в агробизнесе», к.т.н., доцент Д.Т. Халиуллин составили настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы соискателя кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе» Пополднева Родиона Сергеевича на тему: «Разработка конструкции и обоснование параметров измельчитель-смесителя кормов» используются в учебном процессе Института механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанского ГАУ.

Материалы диссертационной работы используется студентами, обучающимися по направлениям 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ, а также при изучении дисциплин «Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства и животноводства» и «Техника и технологии для животноводства».

Директор Института механизации и  
технического сервиса ФГБОУ ВО  
Казанского ГАУ, к.т.н., доцент



В.М. Медведев

Зав. каф. МОА,  
к.т.н., доцент



Д.Т. Халиуллин

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и  
инновациям ФГБОУ ВО Казанского  
ГАУ, д.т.н., профессор

М.Н. Калимуллин

«28» апреля 2025г.

АКТ

об использовании (внедрении) измельчителя-смесителя кормов в учебном  
процессе кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе»

Мы, директор Института механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанского ГАУ, к.т.н., доцент В.М. Медведев и заведующий кафедрой «Машины и оборудование в агробизнесе», к.т.н., доцент Д.Т. Халиуллин составили настоящий акт о том, что измельчитель-смеситель кормов соискателя кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе» Пополднева Родиона Сергеевича внедрен в учебный процесс Института механизации и технического сервиса ФГБОУ ВО Казанского ГАУ.

Измельчитель-смеситель кормов используется студентами, обучающимися по направлению 35.03.06 Агроинженерия при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Технологическое оборудование для переработки продукции растениеводства и животноводства» и «Техника и технологии для животноводства».

Директор Института механизации и  
технического сервиса ФГБОУ ВО  
Казанского ГАУ, к.т.н., доцент

В.М. Медведев

Зав. каф. МОА,  
к.т.н., доцент

Д.Т. Халиуллин

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио ректора ФБГОУ ВО



ИГ. Нуриев

2025г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Глава КФХ ИП Имамеева Финавзия

Минехановна, Рыбно-Слободской

муниципальный район РТ

*Насиб* Ф.М. Имамеева

« 12 » *МАР* 2025г.

## АКТ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ-СМЕСИТЕЛЯ  
КОРМОВ

Мы, нижеподписавшиеся комиссия в составе, от: КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна Рыбно-Слободского района Республики Татарстан: глава КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна, управляющий КФХ Гимадиев Ракиф Гарипович, зоотехник Сайфутдинов Фаиль Шигабутдинович с одной стороны, и Казанского ГАУ: д.т.н. профессор Б.Г. Зиганшин, заведующий кафедрой, к.т.н., доцент Д.Т. Халиуллин, к.т.н., доцент И.Х. Гайфуллин, соискатель Р.С. Пополднев составили настоящий акт о нижеследующем.

В условиях КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна Рыбно-Слободского района Республики Татарстан, расположенного в средней части Республики Татарстан, в 95 км. от г. Казани, проводились производственные испытания экспериментального образца измельчителя-смесителя кормов, разработанного на кафедре машин и оборудования в агробизнесе в условиях сельхозпроизводителя с целью проверки работоспособности измельчителя-смесителя и получения результатов эффективности работы.

Испытания проводились с клубнями картофеля сорта «Лорх», заготовленного по ГОСТ 7176-2017 без предварительного разделения на фракции по размерам в период с 12.04.2025 г. по 07.05.2024 г.

Режим работы и характеристика измельчителя-смесителя:

- частота вращения ротора измельчителя, мин<sup>-1</sup> ..... 1000-1400
- мощность электродвигателя, кВт ..... 1,5
- производительность, т/час ..... 0,5
- масса измельчителя-смесителя, кг ..... 65
- количество рядов ножей, шт. ..... 8

- влажность клубней картофеля, %..... 78,56

Измерение частоты вращения ротора проводилось комбинированным тахометром (2-ый класс точности). Влажность клубней определялась анализатором влажности «ЭВЛАС-2М» (погрешность влагомера – не более  $\pm 0,2 \%$ .) согласно ГОСТ 13496.3-92 Комбикорма, комбикормовое сырьё. Методы определения влаги и ГОСТ 28561-90 Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сухих веществ или влаги.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный на кафедре машин и оборудования в агробизнесе ФГБОУ ВО Казанский ГАУ измельчитель-смеситель для приготовления кормов в условиях сельхозпредприятий в результате производственных испытаний показал хорошую работоспособность при измельчении клубней картофеля с влажностью 78,56% для скармливания животным в течении с 12 апреля по 07 мая 2025 г.

По итогам испытаний установлено, что производительность машины, в зависимости от частоты вращения, составляет 0,42...0,58 т/ч, при этом степень измельчения – 4,5; однородность – 90%; потери сока 2,1%.



М.Н. Калимуллин

Руководитель НИР, д.т.н. профессор

 Б.Г. Зиганшин

Ответственный исполнитель

 Д.Т. Халиуллин

Исполнитель

 И.Х. Гайфуллин

Исполнитель

 Р.С. Пополднев

От предприятия:

Глава КФХ ИП Имамеева  
Финавзия Минехановна

 Ф.М. Имамеева

Управляющий

 Р.Г. Гимадиев

Зоотехник

 Ф.Ш. Сайфутдинов



**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**

**КФХ Индивидуальный предприниматель Имамеева Финавзия Минехановна**

**КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна**

Юридический адрес: 422656, РТ., Рыбно-Слободский р-н, д. Новый Арыш, ул. Школьная, д. 50

Почтовый адрес: 420141, г. Казань, ул. Кул Гали 2Б, офис 401

Тел. +7 965 594-63-57, E-mail: imameevaipkfk@mail.ru

ОКПО-0136685854 ИНН/ОГРН 163400357139/04167636600188

« 12 » июль 2025 г. № 365/1

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**  
результатов научно-исследовательских, опытно-  
конструкторских и технологических работ  
в высших учебных заведениях

**Заказчик КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна**

(наименование организации)

**Имамеева Финавзия Минехановна**

(Ф.И.О. руководителя организации)

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы

**Измельчитель-смеситель кормов (16-22 НИР)**

(наименование темы, № гос. регистрации)

**выполненного в 2020-2025 гг. на кафедре «Машины и оборудование в агробизнесе» Казанского государственного аграрного университета**

(наименование вуза, НИИ, КБ)

Стоимостью **75000 (семьдесят пять тысяч руб. 00коп.) руб.**

**в КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна**

(наименование предприятия, где осуществлялось внедрение)

1. Вид внедренных результатов **эксплуатация и функционирование измельчителя-смесителя кормов**

(эксплуатация (изделий, работы, технологии); производство (изделий, работы, технологии); функционирование (систем))

2. Характеристика масштаба внедрения **единичное**  
(уникальное, единичное, партия, массовое, серийное)

3. Форма внедрения:

Методика (метод) **Рекомендации**

4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: **качественно новые** (пионерские, принципиально новые, качественно новые, модификации, модернизация, модернизация старых разработок)

5. Опытно-промышленная проверка с 24 октября 2024 года по настоящее время в условиях КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна

6. Внедрены:

- в промышленное производство участок по кормопроизводству  
(участок, цех (цеха), процесс)

- в проектные работы: Измельчитель-смеситель кормов, КФХ ИП Имамеева Финавзия Минехановна Рыбно-Слободского района Республики Татарстан  
(указать объект, предприятие)

7. Годовой экономический эффект

ожидаемый 142933,60 (сто сорок две тысячи девятьсот тридцать три руб. 60 коп.) руб.

(от внедрения в проект, цифрами и прописью)

8. Объем внедрения: единичный, что составляет 100 % от объема внедрения положенного в основу расчета гарантированного экономического эффекта рассчитанного по окончании.

9. Специальный и научно-технический эффект Снижение затрат энергии, а также увеличение качества измельченного корма

(охрана окружающей среды, недр; улучшении и оздоровлении условий труда, совершенствование структуры управления, научно технических направлений, специальные назначения и т.д.)

От вуза:

Руководитель НИР, д.т.н. профессор

Б.Г. Зиганшин

Заведующий кафедрой

Д.Т. Халиуллин

Соискатель

Р.С. Пополднев

От предприятия:

Глава КФХ ИП Имамеева  
Финавзия Минехановна

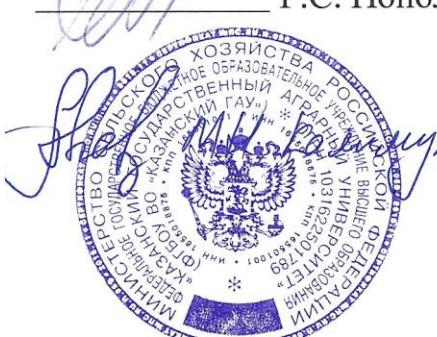
Ф.М. Имамеева

Управляющий

Р.Г. Гимадиев

Зоотехник

Ф.Ш. Сайфутдинов



## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО  
ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
(ФГБОУ ВО Казанский ГАУ)



РЭСЭЙ ФЕДЕРАЦИЯСЕНЕЦ АВЫЛ  
ХУЖАЛЫГЫ МИНИСТРЛЫГЫ  
югари белем бирү федераль дэүлэлт  
бюджет мэгариф учреждениесе  
**«КАЗАН ДЭҮЛЭТ АГРАР  
УНИВЕРСИТЕТЫ»**  
(ЮББ ФДБМУ Казан Дау)

420015, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 65, тел. +7 (843) 598-40-50, факс + 7 (843) 236-66-51,  
E-mail: info@kazgau.com, Web-сайт: www.kazgau.ru  
ОКПО 00493635, ОГРН 1031622501789, ИНН 1655018875, КПП 165501001

*19.09.2025 № 01-1385/1*

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## СПРАВКА

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»  
удостоверяет, что результаты научно-исследовательской работы Пополднева  
Родиона Сергеевича на тему: «Разработка конструкции и обоснование  
параметров измельчителя-смесителя кормов» выполненной на кафедре  
«Машины и оборудование в агробизнесе» под руководством д.т.н.,  
профессора Зиганшина Б.Г. экспонировались в 2022, 2023, 2024 гг. на  
Специализированных сельскохозяйственных выставках достижений АПК  
«ТатАгроЭкспо», которые проводились в Международном выставочном  
центре «Казань Экспо».

Проректор по научной работе и инновациям,  
д.т.н., профессор



*М.Н. Калимуллин*

Начальник отдела научных  
исследований и инноваций

*Р.Р. Ахметзянов*

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2760435

## ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-СМЕСИТЕЛЬ КОРМОВ

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)**

Авторы: **Зиганишин Булат Гусманович (RU), Дмитриев Андрей Владимирович (RU), Халиуллин Дамир Тагирович (RU), Кашианов Ильдар Ильясович (RU), Нафиков Инсаф Рафитович (RU), Пополднев Радион Сергеевич (RU), Хайдаров Рамиль Рафисович (RU)**

Заявка № 2021106282

Приоритет изобретения **10 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **25 ноября 2021 г.**Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **10 марта 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ильин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 2 760 435<sup>(13)</sup> C1(51) МПК  
A01F 29/02 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**(52) СПК  
A01F 29/02 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021106282, 10.03.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
10.03.2021Дата регистрации:  
25.11.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.03.2021

(45) Опубликовано: 25.11.2021 Бюл. № 33

Адрес для переписки:  
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65,  
ФГБОУ ВО Казанский ГАУ, отдел научных  
исследований и инноваций

(72) Автор(ы):

Зиганшин Булат Гусманович (RU),  
Дмитриев Андрей Владимирович (RU),  
Халиуллин Дамир Тагирович (RU),  
Кашанов Ильдар Ильясович (RU),  
Нафиков Инсаф Рафитович (RU),  
Пополднев Радион Сергеевич (RU),  
Хайдаров Рамиль Рафисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Казанский государственный  
аграрный университет" (ФГБОУ ВО  
Казанский ГАУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 196834 U1, 17.03.2020. SU 961767  
A1, 30.09.1982. RU 2072765 C1, 10.02.1997. RU  
153401 U1, 20.07.2015. US 4594841 A1, 17.06.1986.  
CN 102696363 A, 03.10.2012. CN 209299774 U,  
27.08.2019.**(54) ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-СМЕСИТЕЛЬ КОРМОВ****(57) Формула изобретения**

Измельчитель-смеситель кормов, содержащий рабочую камеру с приемным бункером, выгрузную камеру с размещенной в ней пальцевой швырялкой и измельчающие ножи на валу, отличающийся тем, что поворотные противорежущие ножи, ширина которых равна 0,8...0,9 расстояния между измельчающими ножами, имеют возможность поворота и фиксации под углом от 0° до 90° к измельчающему ножу.

R U 2 7 6 0 4 3 5 C 1

R U 2 7 6 0 4 3 5 C 1

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2788535**

**ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-СМЕСИТЕЛЬ КОРМОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Пополднев Радион Сергеевич (RU), Зиганшин Булат Гусманович (RU), Дмитриев Андрей Владимирович (RU), Халиуллин Дамир Тагирович (RU), Аleshkin Алексей Владимирович (RU), Карапов Ильдар Ильясович (RU), Сабиров Булат Миннефаилевич (RU), Хайдаров Рамиль Рафисович (RU)*

Заявка № 2022105492

Приоритет изобретения 28 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

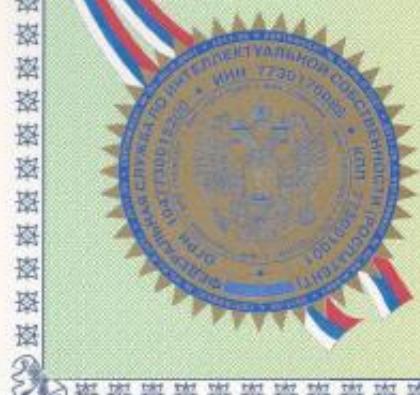
Российской Федерации 23 января 2023 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 февраля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19)

RU (11)

2 788 535<sup>(13)</sup> С1

(51) МПК

A01F 29/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(52) СПК

A01F 29/00 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022105492, 28.02.2022

(24) Дата начала отчета срока действия патента:  
28.02.2022Дата регистрации:  
23.01.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.02.2022

(45) Опубликовано: 23.01.2023 Бюл. № 3

Адрес для переписки:

420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65, КГАУ,  
одел научных исследований и инноваций

(72) Автор(ы):

Пополднев Радион Сергеевич (RU),  
Зиганшин Булат Гусманович (RU),  
Дмитрисев Андрей Владимирович (RU),  
Халиуллин Дамир Тагирович (RU),  
Алешкин Алексей Владимирович (RU),  
Кашапов Ильдар Ильясович (RU),  
Сабиров Булат Миннефаилевич (RU),  
Хайдаров Рамиль Рафисович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Казанский государственный  
аграрный университет" (ФГБОУ ВО  
Казанский ГАУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2760435 С1, 25.11.2021. SU 339269  
A, 24.05.1972. RU 144259 U1, 20.08.2014. EP  
3241606 A1, 08.11.2017. CA 2529387 A1,  
29.05.2007. US 5443588 A, 22.08.1995.

RU 2788535 С1

## (54) ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-СМЕСИТЕЛЬ КОРМОВ

## (57) Формула изобретения

Измельчитель-смеситель кормов, содержащий рабочую камеру с приемным бункером, измельчающие ножи на валу, поворотные противорежущие ножи на внутренней поверхности рабочей камеры, выгрузную камеру, отличающийся тем, что в выгрузной камере размещена лопастная швырялка в виде вогнутой в сторону вращения пластины, на которой перпендикулярно к ее поверхности с возможностью доизмельчения корма резанием со скольжением установлены режущие ножи, повторяющие форму пластины.

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 230912**

### ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-СМЕСИТЕЛЬ КОРМОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный аграрный университет" (ФГБОУ ВО Казанский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Халиуллин Дамир Тагирович (RU), Гайфуллин Ильнур Хамзович (RU), Зиганшин Булат Гусманович (RU), Карапов Ильдар Ильясович (RU), Дмитриев Андрей Владимирович (RU), Нафиков Инсаф Рафитович (RU), Лушнов Максим Александрович (RU), Лукманов Руслан Рушанович (RU), Хусаинов Раиль Камилевич (RU), Сабиров Булат Миннефаилевич (RU), Пополднев Радион Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024132912

Приоритет полезной модели **01 ноября 2024 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **24 декабря 2024 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **01 ноября 2034 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Ю.С. Зубов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19)

**RU**

(11)

**230 912<sup>(13)</sup>****U1**

(51) МПК

A01F 29/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК

A01F 29/00 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024132912, 01.11.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
01.11.2024Дата регистрации:  
24.12.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.11.2024

(45) Опубликовано: 24.12.2024 Бюл. № 36

Адрес для переписки:

420015, Респ. Татарстан, г. Казань, ул. К.  
Маркса, 65, ФГБОУ ВО КГАУ, Валиев Айрат  
Расимович

(72) Автор(ы):

Халиуллин Дамир Тагирович (RU),  
Гайфуллин Ильнур Хамзович (RU),  
Зиганшин Булат Гусманович (RU),  
Кашапов Ильдар Ильясович (RU),  
Дмитриев Андрей Владимирович (RU),  
Нафиков Инсаф Рафитович (RU),  
Лушнов Максим Александрович (RU),  
Лукманов Руслан Рушанович (RU),  
Хусаинов Раиль Камилевич (RU),  
Сабиров Булат Миннефандиевич (RU),  
Пополднев Радион Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Казанский государственный  
аграрный университет" (ФГБОУ ВО  
Казанский ГАУ) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2788535 C1, 23.01.2023. RU  
2760435 C1, 25.11.2021. RU 2058712 C1,  
27.04.1996. CN 209299774 U, 27.08.2019.

(54) ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ-СМЕСИТЕЛЬ КОРМОВ

(57) Формула полезной модели

Измельчитель-смеситель кормов, включающий рабочую камеру с приемным бункером, направляющие, измельчающие ножи на валу и выгрузную камеру, в которой установлена лопастная швырятка в виде вогнутой в сторону вращения пластины, отличающейся тем, что он снабжен противорежущими ножами, установленными на внутренней поверхности рабочей камеры и выполненными в виде основных горизонтальных и дополнительных вертикальных лезвий.

R U 2 3 0 9 1 2 U 1

R U 2 3 0 9 1 2 U 1