

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ – МСХА
имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

ПАВЛОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ
РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
МАШИН ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Скороходов Дмитрий Михайлович

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1. Анализ состояния технического оснащения животноводства и обоснование необходимости импортозамещения рабочих органов	11
1.2. Анализ условий эксплуатации рабочих органов смесителей- кормораздатчиков и их классификация	17
1.2.1. Классификация рабочих органов современных смесителей- кормораздатчиков	17
1.2.2. Характеристика кормовых рационов и состава кормовой среды для КРС	22
1.2.3. Условия эксплуатации рабочих органов смесителей- кормораздатчиков	25
1.2.4. Основные дефекты режущих элементов	29
1.3. Анализ методов и средств испытания рабочих органов сельскохозяйственных машин	32
1.4. Требования к новой методике ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства	50
1.5. Основные выводы по первой главе. Цель и задачи исследования.	52
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ И МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОНАЩЕНИЯ ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ	54
2.1. Обоснование параметров среды ускоренных испытаний режущих элементов	56
2.2. Формирование модели технического оснащения установки для ускоренных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов машин для животноводства	62

2.3. Обоснование конструктивных параметров установки для ускоренных испытаний режущих элементов	66
2.4. Теоретические исследования прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания	72
2.5. Обоснование критериев предельного состояния режущих элементов	80
2.6. Интегральный критерий выбора материалов и упрочняющих технологий.....	85
2.7. Выводы по второй главе	86

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

3.1. Методика исследования	88
3.2. Объект и предмет исследования	90
3.3. Оборудование, субстрат и режимы испытаний	91
3.3.1. Установка для ресурсных испытаний режущих элементов	91
3.3.2. Субстрат и режимы испытаний.....	93
3.4. Методика расчета прочностного анализа	95
3.5. Методика оценки коррозионно-механического изнашивания режущих элементов.....	96
3.5.1. Методика измерения геометрических параметров режущих элементов при ускоренных испытаниях	96
3.5.2. Методика оценки уровня механического изнашивания	99
3.5.3. Методика оценки уровня коррозионного изнашивания.....	100
3.6. Методика исследования упрочненного покрытия	101
3.7. Методика прогнозирования долговечности режущих элементов	102
3.8. Выводы по третьей главе	102

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

4.1. Результаты исследований прочностного расчёта.....	103
--	-----

4.2. Результаты расчёта оптимального угла установки режущих элементов.....	104
4.3. Результаты исследований упрочненного CrN – покрытия стали 9ХС ...	108
4.4. Результаты исследований износа геометрических параметров.....	110
4.5. Результаты исследований механического изнашивания.....	113
4.6. Результаты исследований коррозионного изнашивания.....	115
4.7. Результаты исследований прогнозирования долговечности режущих элементов.....	116
4.8. Выводы по четвертой главе	118

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ И РЕКОМЕНДАЦИИ

ПРОИЗВОДСТВУ	119
5.1. Экономическая эффективность применения разработанной методики .	119
5.2. Рекомендации производству	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Режущие элементы машин для животноводства и кормопроизводства играют важную роль в обработке кормовых ингредиентов и создании однородных кормовых смесей.

По данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, техническое оснащение отрасли животноводства на 2024 год является импортным и составляет 95% от общего количества, поставляемые рабочие органы также являются импортными. Их приобретение и доставка с введением санкций усложнились, стоимость резко выросла, логистика усложнилась.

Отечественная сельскохозяйственная техника по многим показателям качества уступает машинам ведущих зарубежных фирм. Из-за низкого уровня ее надежности сельские товаропроизводители несут значительные экономические потери. Более половины (55 %) машинно-тракторного парка АПК РФ составляют машины со сроком эксплуатации старше 10 лет, что свидетельствует о высокой степени их физического износа. Затраты на ремонт, запчасти и поддержание машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии в структуре себестоимости сельскохозяйственной продукции составляют более 12%.

Импортозамещение сельскохозяйственной техники и ее комплектующих является одной из приоритетных задач агропромышленного комплекса России. Рабочие органы машин для животноводства включены в перечень критической промышленной продукции в отрасли сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации на 2024...2026 годы.

В настоящее время, в условиях санкций, особенно остро стоит вопрос необходимости замены дорогостоящих импортных рабочих органов отечественными, обладающими высокой износостойкостью и работоспособностью. Для решения этой задачи необходимы новые материалы и технологии.

Важным этапом в формировании долговечных рабочих органов является подбор материалов и выбор рациональных способов упрочнения их рабочих

поверхностей, обеспечивающих высокую эффективность работы в зависимости от условий эксплуатации.

Степень разработанности. В настоящее время вопросами повышения долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин активно занимаются научные подразделения вузов, конструкторские отделы заводов-изготовителей, отраслевые НИИ.

Большой вклад в изучение вопросов изнашивания рабочих органов сельскохозяйственных машин и разработку мер по повышению их работоспособности и долговечности внесли следующие ученые: Крагельский И.В., Тененбаум М.М., Хрущев М.М., Виноградов В.Н., Ерохин М.Н., Голубев И.Г., Левшин А.Г., Ермолов Л.С., Краснощеков Н.В., Севернев М.М., Новиков В.С., Арчард Дж.Ф., Бойко А.И., Казанцев С.П., Федоров С.К., Балабанов В.И., Петров В.А. и многие другие ученые.

Однако, большинство известных решений направлено на повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающей техники, в то время как вопросами ресурса режущих элементов машин для приготовления и раздачи кормов уделено недостаточно внимания.

Существующие методы и средства испытаний не позволяют моделировать комплексное коррозионно-механическое изнашивание и проводить ускоренную оценку долговечности режущих элементов в условиях, приближенных к реальным. Это затрудняет объективный выбор материалов и упрочняющих технологий для импортозамещения режущих элементов. В этой связи возникает необходимость в разработке новой методики ускоренных испытаний машин для животноводства, учитывающей специфику коррозионно-механического воздействия кормовых сред.

Цель исследования. Разработка методики ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, позволяющей прогнозировать их долговечность и обоснованно выбирать материалы и упрочняющие технологии.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели исследования предусмотрено решение следующих основных задач:

1. Провести аналитический обзор условий эксплуатации рабочих органов машин для животноводства и анализ методов и средств их испытаний на коррозионно-механическое изнашивание;

2. Обосновать состав имитирующего субстрата, обеспечивающего коррозионно-механический характер изнашивания, и позволяющего максимально приблизить условия лабораторных исследований к реальным эксплуатационным нагрузкам;

3. Разработать математическую модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания;

4. Разработать методику ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, включающую программу и последовательность проведения экспериментов, и разработать установку для ресурсных испытаний режущих элементов в условиях, приближенных к эксплуатационным;

5. Провести экспериментальные исследования коррозионно-механического изнашивания режущих элементов и установить влияние эксплуатационных факторов на их долговечность;

6. Выполнить оценку экономической эффективности применения разработанной методики.

Объект исследования. Процесс коррозионно-механического изнашивания режущих элементов машин для животноводства в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Предмет исследования. Режущие элементы горизонтальных смесителей-кормораздатчиков, их взаимосвязь с эксплуатационными факторами и методами упрочнения.

Научная новизна заключается в разработанных:

1. Методике ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, включающей обоснование параметров имитирующей среды, разработку установки для ускоренных испытаний.

2. Установлении кинетических зависимостей изменения геометрических, массовых и коррозионных параметров изнашивания от наработки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Научно обоснованы параметры среды ускоренных испытаний режущих элементов машин для животноводства и конструктивные параметры установки для ускоренных испытаний. Получена математическая модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания. Установлены кинетические зависимости изменения геометрических, массовых и коррозионных параметров изнашивания режущих элементов от наработки. Разработана методика ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства. Методика утверждена и внедрена в мае 2025 г. ФГБУ «Государственный испытательный центр». Разработана установка для ресурсных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов машин для животноводства (патент RU2842437). Определены рациональные конструктивные параметры установки для ускоренных испытаний (количество испытуемых режущих элементов, углы их установки и расстояния между держателями), обеспечивающие равномерность распределения субстрата и достоверность результатов.

Методология и методы исследований. Теоретической и методологической основой для разработки методики ускоренных испытаний режущих элементов машин и оборудования для животноводства послужили государственные стандарты и ранее разработанные методические указания, регламентирующие порядок проведения испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость. Использованы положения МУ 105-0-068-83 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания режущих элементов в растительных средах. Методические указания», «Методика производственных испытаний режущего инструмента по оценке эффективности упрочняющих технологий», а также ГОСТ 23.205-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима» и ГОСТ 9.908-85 «Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости».

Экспериментальные исследования выполнялись на установке (патент RU2842437), разработанной для ускоренных испытаний. Работы выполнялись в

лабораторных условиях Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина ФГБОУ ВО РАГУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Методика исследований включала: определение потери массы режущих элементов и расчёт интенсивности изнашивания; анализ изменения геометрии лезвия методом снятия оттисков; оценку степени коррозионного поражения поверхности металла; исследование влияния состава среды и режимов нагружения на интенсивность коррозионно-механического изнашивания.

Планирование эксперимента осуществлялось на основе методов математической статистики – реализован двухфакторный эксперимент с повторными изменениями во времени. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием прикладных программ Statistica 10 и Microsoft Excel 2024.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование параметров среды ускоренных испытаний режущих элементов.
2. Обоснование конструктивных параметров установки для ускоренных испытаний.
3. Математическая модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания.
4. Методика ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства.
5. Установка для ресурсных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов машин для животноводства.
6. Кинетические зависимости изменения геометрических, массовых и коррозионных параметров изнашивания от наработки.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов исследований подтверждена лабораторными и производственными экспериментами с использованием современных средств измерений. Полученные теоретические зависимости и экспериментальные данные

расширяют и дополняют методики ускоренных испытаний рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Материалы диссертации доложены, обсуждены и одобрены на: Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию Тимирязевской академии (г. Москва, 02-04 июня 2025 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие инженерного образования и его роль в техническом обеспечении инновационных технологий АПК», посвящённой 70-летию инженерного факультета Удмуртского государственного аграрного университета (г. Ижевск, 14 ноября 2025 г.); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича (г. Москва, 03-05 июня 2024 г.); Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвящённой 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.);

Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (г. Москва, 05-07 июня 2023 г.).

Публикации результатов исследований. Основные положения и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и патент на изобретение №2842437.

Структура и объём диссертации. Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список используемых источников информации из 164 наименований, в том числе 17 на иностранном языке и приложения на 16 страницах. Объём диссертации – 168 страниц, поясняется 10 таблицами и 57 рисунками.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ состояния технического оснащения животноводства и обоснование необходимости импортозамещения рабочих органов

Современное состояние агропромышленного комплекса России характеризуется повышенным вниманием к вопросам технологического суверенитета. В 2025 году стартовал национальный проект «Технологическое обеспечение продовольственной безопасности»¹, главной целью которого является снижение зависимости от импорта и переход на собственные технологические решения².

Животноводство является важным сегментом экономики любой страны, обеспечивающий население всеми необходимыми продуктами питания (мясо, молоко, яйца) [119, 122]. Одним из важных составляющих высокой продуктивности сельскохозяйственных животных и получения высококачественных продуктов питания является полнорационное и сбалансированное кормление животных, это самый трудоёмкий технологический процесс в животноводстве, на который приходится до 70% трудозатрат [67, 152].

Поэтому эффективность животноводства определяется уровнем механизации кормоприготовления и кормораздачи. Как следствие, продукция животноводства занимает ведущее место в валовой продукции сельского хозяйства, удельный вес которой сохраняется на уровне 47-48% [92].

Анализ данных Росстата показывает, что продукция животноводства на 2022 год составляет 3585,3 миллиардов рублей, что на 6,6% больше показателей 2000 года [117, 118].

Однако, достигнутые объёмы производства обеспечиваются ценой высокой нагрузки на техническую базу. Анализ приобретения новой техники за 2022-

¹ Информация согласно: <https://национальныепроекты.рф/new-projects/tekhnologicheskoe-obespechenie-prodovolstvennoy-bezopasnosti/tekhnika-i-oborudovanie-dlya-apk/>

² Информация согласно https://www.vedomosti.ru/industry/industrial_policy/articles/2025/11/13/1154410-stavka-na-tehnologii-agrarnii-sektor

2024 гг (рис. 1.1) показывает критическое снижение инвестиций в обновление парка техники.

За три года закупки сократились более чем в 1,7 раз по всем видам машин (зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов, тракторов) снизилось в разы: зерноуборочные комбайны с 5385 ед. (2022 г) до 2957 ед. (2024 г), то есть приобретение зерноуборочных комбайнов снизилось в 1,83 раза; кормоуборочные комбайны с 597 ед. до 343 ед., то есть приобретение кормоуборочных комбайнов снизилось в 1,74 раза; тракторы с 12991 ед. до 7807 ед., то есть приобретение тракторов снизилось в 1,66 раза.

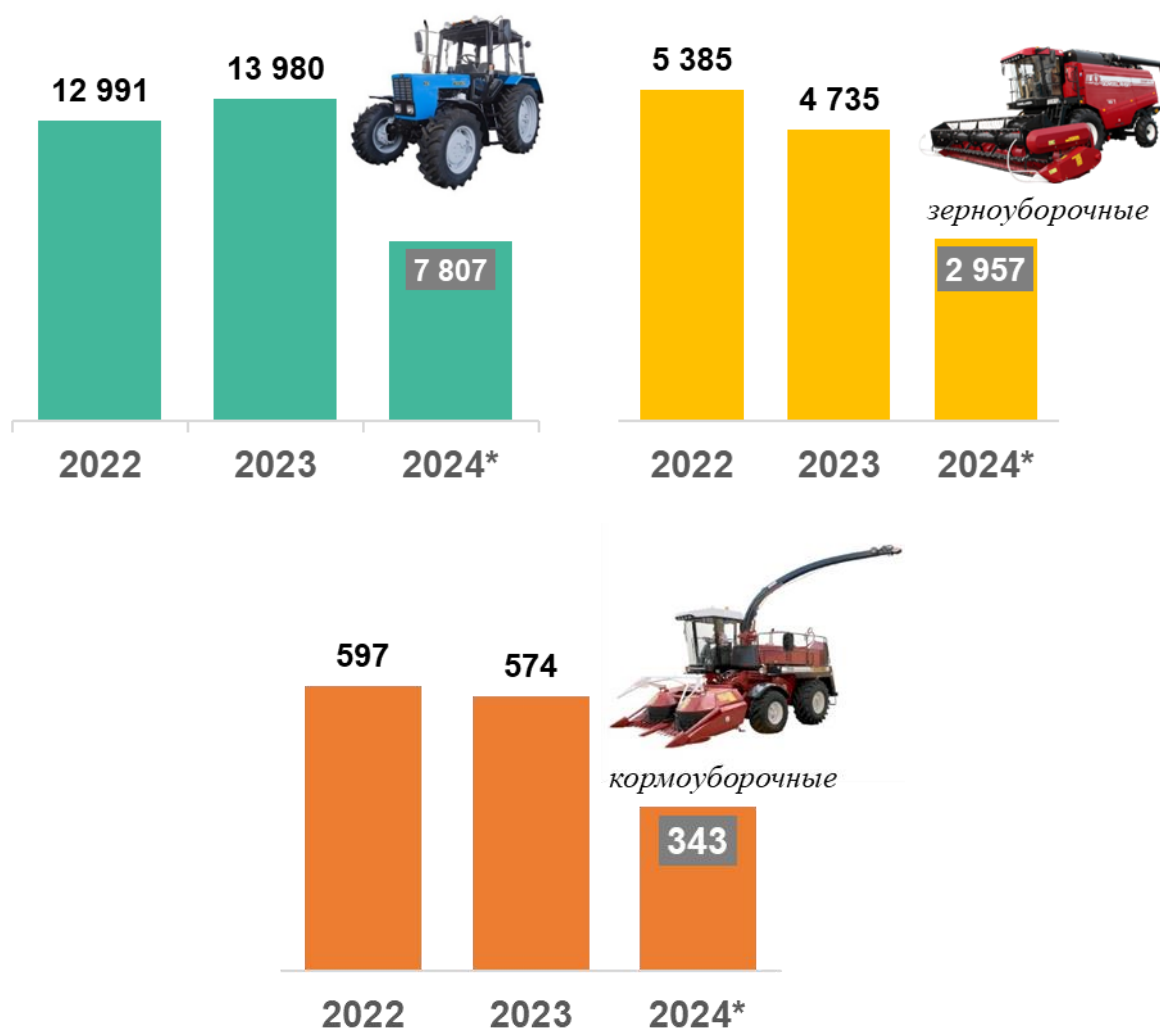


Рисунок 1.1 – Приобретение сельскохозяйственной техники в РФ, единицы
(по данным Министерства сельского хозяйства)

Если в 2023 году объемы закупок сократились примерно в двое по сравнению с 2022 годом, то в 2024 году они достигли минимальных значений (менее 600 ед. по каждой позиции). Такая динамика свидетельствует о глубоком кризисе обновления парка техники.

По данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, техническое оснащение отрасли животноводства на 2024 год является импортным и составляет 95% от общего количества (рис. 1.2) [71].

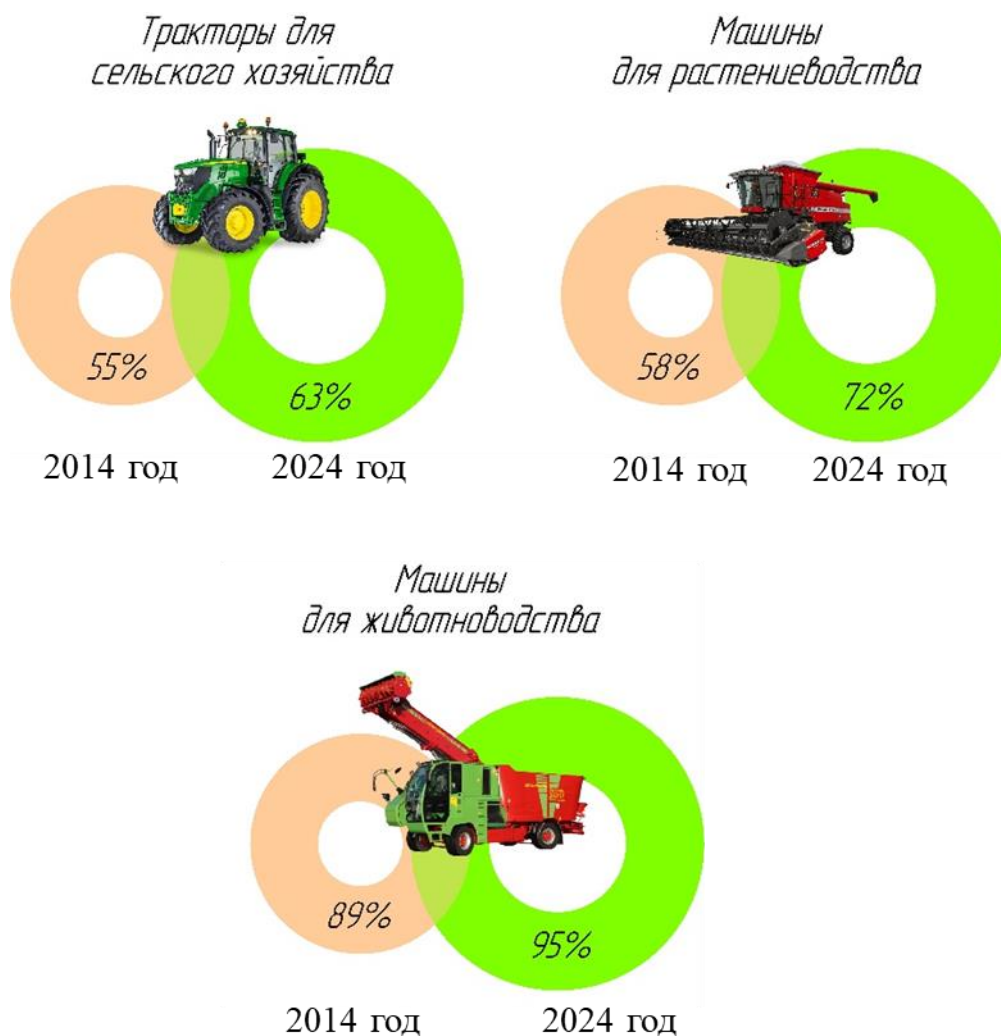


Рисунок 1.2 – Доля импорта сельскохозяйственной техники на рынке РФ (%)

Рабочие органы сельскохозяйственной техники так же являются импортными, а из-за санкционных условий их поставка усложнилась, стоимость резко возросла.

Следствием низкой интенсивной активности в обновлении техники стала деградация возрастной структуры парка. Более половины (55 %) машинно-тракторного парка АПК РФ составляют машины со сроком эксплуатации старше 10 лет (рис. 1.3), что свидетельствует о высокой степени их физического износа (рис. 1.4).

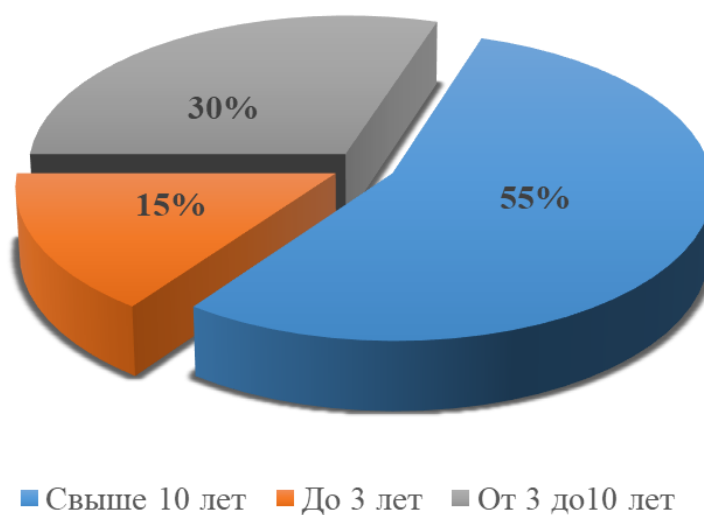


Рисунок 1.3 – Возрастной состав парка техники в РФ

Для сельскохозяйственной техники превышение 10-ти летнего рубежа означает выход за пределы нормативного срока службы, заложенного производителями (обычно 7-10 лет для комбайнов и тракторов средней интенсивности использования), в том числе накопление усталостных повреждений в несущих конструкциях.

Старение парка напрямую влияет на надежность машин в ответственные агротехнические требования [15]. Для животноводства это особенно критично, поскольку кормоуборочные комбайны и кормосмесители работают дискретно, в сжатые агротехнические сроки. Любой отказ старой машины в период заготовки силоса или сенажа может привести к потере до 30-40% объемов кормов или к их низкому качеству, что напрямую отражается на продуктивности животных.

Эксплуатация смесителей-кормораздатчиков вызывает интенсивное коррозионно-механическое изнашивание (рис. 1.4), как несущих элементов машины, так и сменных рабочих органов (шнеков, режущих элементов, противорежущих пластин и др.)

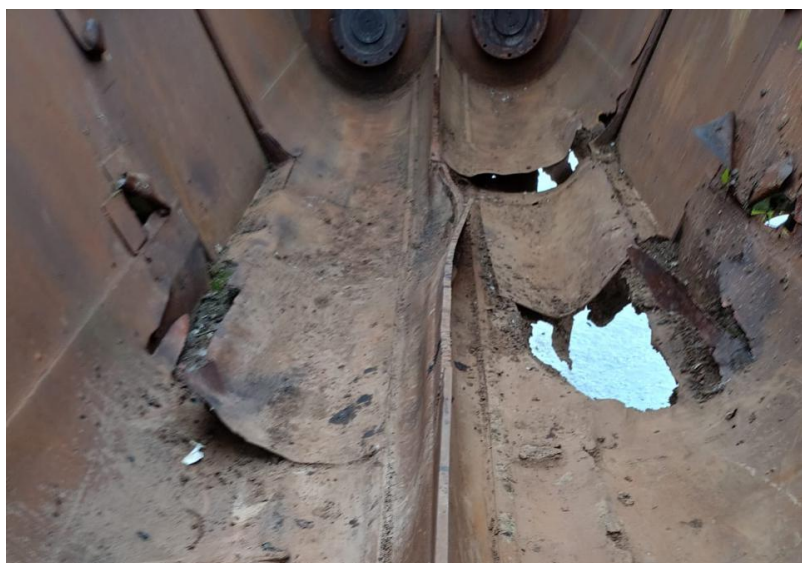


Рисунок 1.4 – Износ смесителей-кормораздатчиков и их рабочих органов

Закономерным следствием такого износа является рост расходов на поддержание работоспособности техники. По оценкам специалистов, затраты на ремонт, запчасти и поддержание машинно-тракторного парка в работоспособном состоянии в структуре себестоимости сельскохозяйственной продукции составляют более 12%.

На фоне резкого сокращения закупок новой техники и санкционных условий, для поддержания работоспособности существующего парка техники необходимо продлевать ресурс изнашиваемой техники и ее рабочих органов.

Импортозамещение сельскохозяйственной техники и ее комплектующих является одной из приоритетных задач агропромышленного комплекса России. Рабочие органы машин для животноводства включены в перечень критической промышленной продукции в отрасли сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации на 2024...2026 годы (Приказ Минпромторга России от 10.04.2024 N 1525).

Согласно общероссийскому классификатору продукции по видам экономической деятельности (ОКПД 2) код 28.30.83 относится к «Оборудованию для приготовления кормов для животных», в состав которого входят рассматриваемые в диссертационной работе рабочие органы машин для животноводства, а именно:

1. 28.30.83.110 — дробилки для кормов;
2. 28.30.83.120 — измельчители грубых и сочных кормов;
3. 28.30.83.130 — овощётёрки, пастоизготовители и мялки;
4. **28.30.83.140 — смесители кормов;**
5. 28.30.83.180 — мойки и мойки-корнерезки;

Кроме того, актуальность направления исследования подтверждено товарной номенклатурой внешнеэкономической деятельности (ТН ВЭД):

8208 40 000 0 обозначает ножи и режущие лезвия для машин, применяемых в сельском хозяйстве, садоводстве или лесном хозяйстве.

Таким образом, рассматриваемый вопрос о разработке методики для ресурсных ускоренных испытаний рабочих органов машин для животноводства является актуальным. В настоящее время, в условиях санкций, особенно остро стоит вопрос необходимости замены дорогостоящих импортных рабочих органов отечественными, обладающими высокой износостойкостью и работоспособностью. Для решения этой задачи необходимы новые материалы и технологии.

Важным этапом в формировании долговечных рабочих органов является подбор материалов и выбор рациональных способов упрочнения их рабочих поверхностей, обеспечивающих высокую эффективность работы в зависимости от условий эксплуатации.

1.2. Анализ условий эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков и их классификация

1.2.1. Классификация рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков³

Проведенный анализ сельскохозяйственной техники для животноводства позволил составить классификацию рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков (рис. 1.5) [64].

Шнек является «сердцем» рабочего органа смесителя-кормораздатчика, от него зависит потребляемая мощность, время смешивания, эффективность резки, качество волокна и смеси, однородность ингредиентов, чистота резервуара и равномерность потока выгрузки.

Одношнековые смесители-кормораздатчики имеют один центральный шнек, который вращается и перемешивает кормовые ингредиенты внутри барабана. Одношнековые шнеки обычно обеспечивают хорошую эффективность смешивания и распределения корма.

Двухшнековые смесители-кормораздатчики имеют два параллельных шнека, которые работают вместе для перемешивания корма. Этот тип шнеков может обеспечивать еще более равномерное и интенсивное смешение, особенно при работе с более плотными или крупными кормами.

Трехшнековые смесители-кормораздатчики имеют три параллельных шнека, которые обеспечивают еще более интенсивное перемешивание и измельчение

³ Выполнено совместно с научным руководителем Скороходовым Д.М.

кормовых ингредиентов. Этот тип шнеков позволяет достичь высокой степени однородности кормовой смеси.

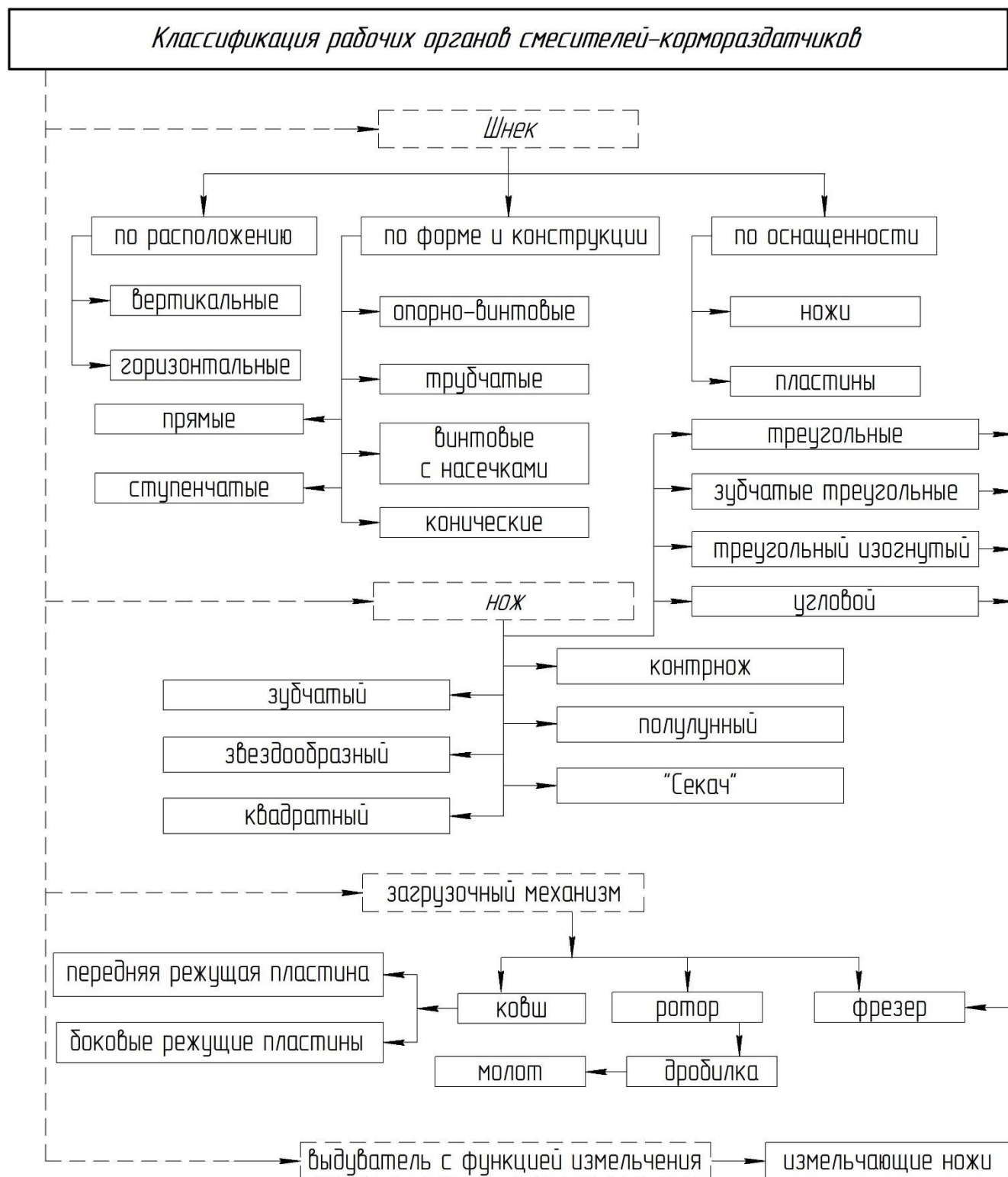


Рисунок 1.5 – Классификация рабочих органов современных смесителей-кормораздатчиков

По расположению шнеки подразделяются на горизонтальное и вертикальное расположение. *Горизонтальный шнек* находится в горизонтальной плоскости и движется вдоль длины кормораздатчика. Он обычно расположен внутри барабана смесителя и отвечает за перемешивание и смешивание корма. *Вертикальный шнек* расположен в вертикальной плоскости и движется по вертикальной оси внутри кормораздатчика. Он может использоваться для перемещения корма из бункера или резервуара вниз или вверх к месту выдачи или смешивания.

По форме и конструкции шнеки бывают:

- опорно-винтовые. В этой конструкции шнек имеет спиральную форму и поддерживается опорным подшипником с одной стороны. Это обеспечивает стабильность и равномерное вращение шнека. Опорно-винтовые шнеки часто используются в горизонтальных кормораздатчиках с одношнековым или двухшнековым принципом работы.

- трубчатые. Этот тип шнеков состоит из гибкой трубы, внутри которой расположен спиральный лист. Такая конструкция позволяет изгибать шнек и достигать нужной формы для перемещения корма. Трубчатые шнеки используются в вертикальных кормораздатчиках или для наклонного перемещения корма в горизонтальных кормораздатчиках.

- винтовые с насечками. Эти шнеки имеют дополнительные насечки или зубья на спиральном листе, которые помогают измельчать кормовые ингредиенты и улучшают качество смешивания. Они применяются для работы с более плотными и жесткими кормами.

- конические. Конструкция конического шнека имеет форму конуса, поэтому площадь сечения шнека изменяется от узкого к широкому концу. Это обеспечивает более интенсивное перемешивание и смешивание кормовых ингредиентов. Конические шнеки обычно используются в кормораздатчиках с повышенной требовательностью к качеству смешивания.

По оснащённости шнек оснащён различными типами ножей (рис. 1.6) для выполнения разных задач в процессе перемешивания и измельчения корма, а для повышения износостойкости шнеки оснащают пластинами, покрывающие кромку

шнеков. Установка заменяемых пластин на шнеке смесителей-кормораздатчиков позволяет увеличить срок службы самого шнека.

Ножи на смесителе-кормораздатчике играют важную роль в обработке кормовых ингредиентов и создании кормовых смесей. Они выполняют несколько функций: 1. *Измельчение* кормовых ингредиентов на более мелкие частицы, что помогает улучшить доступность и усвояемость питательных веществ в корме для животных. 2. *Раздробление* твердых ингредиентов (солома, сено или силос), что облегчает их смешивание с остальными компонентами корма и повышает равномерность распределения ингредиентов в смеси. 3. *Создание однородной кормовой смеси* путем смешивания и перемешивания ингредиентов. Ножи помогают равномерно распределить компоненты корма и создать однородную и качественную смесь, которая обеспечивает равномерное поступление питательных веществ для животных. 4. *Улучшение производительности*. Наличие ножей на смесителе-кормораздатчике позволяет более эффективно смешивать и обрабатывать кормовые ингредиенты. Это может сократить время и усилия, затрачиваемые на процесс подготовки и смешивания корма.

Загрузочный механизм смесителей-кормораздатчиков отвечает за загрузку кормовых ингредиентов в смеситель. В зависимости от типа смесителя-кормораздатчика в качестве загрузочного механизма выступает *ковш*, на котором расположены передняя и боковые режущие пластины. Как правило боковые режущие пластины выполняют возвратно-поступательное движение разрезают заранее подготовленный (прессованный) корм.

Ротор является частью загрузочного механизма большинства самоходных смесителей-кормораздатчиков. Для среза корма на роторе установлены треугольные, треугольно-изогнутые, треугольно-зубчатые и угловые ножи.

В смесителе-кормораздатчике FARESIN модели PF за ротором установлена *дробилка*, на которой закреплены рабочие органы – *молотки* дробилки, выполняющую функцию раздробления кормового материала на более мелкие частицы, которые после дробления попадают в бункер смесителя-кормораздатчика.

В диссертационной работе рассматриваются режущие элементы (ножи) смесителей-кормораздатчиков.

Проведенный анализ фирменных каталогов смесителей-кормораздатчиков и анализ экспозиций Всероссийских выставок «Золотая Осень» 2022-2024 гг. позволил определить типы режущих элементов (рис. 1.6).

Выделенным блоком (треугольные, квадратные, звездообразные и полулунные) режущие элементы в основном применяются в горизонтальных смесителях-кормораздатчиках, а также на фрезерных агрегатах.

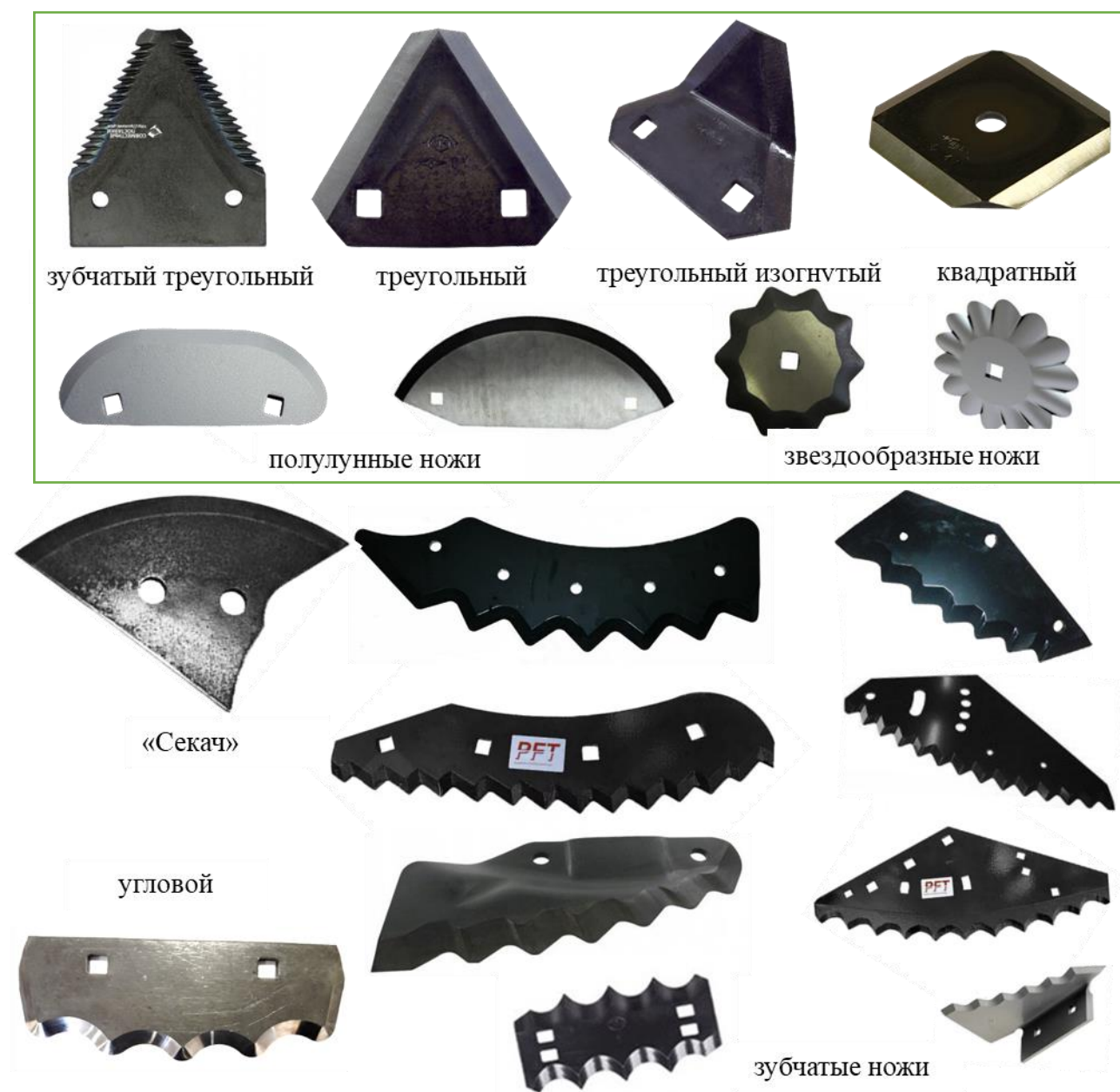


Рисунок 1.6 – Типы режущих элементов современных смесителей-кормораздатчиков

В диссертационных исследованиях в качестве предмета исследования определены режущие элементы горизонтальных смесителей-кормораздатчиков, их взаимосвязь с эксплуатационными факторами и методами упрочнения. Такой выбор обусловлен широкой распространенностью данного типа оборудования в хозяйствах РФ, а также его способностью эффективно работать с наиболее сложными кормами (влажными и глубоковолокнистыми), что предъявляет требования к износостойкости ножей.

1.2.2. Характеристика кормовых рационов и состава кормовой среды для КРС

Крупный рогатый скот в условиях промышленного производства представлен несколькими технологическими группами, существенно различающимися по физиологическому состоянию и, следовательно, по составу кормовых рационов. Наиболее массовыми группами являются дойные коровы и молодняк в откорме. Поскольку именно на эти группы приходится основной объем приготовления и раздачи кормосмесей, их рационы определяют спектр нагрузок, действующих на рабочие органы смесителей-кормораздатчиков и измельчителей. Технология приготовления полнорационных кормовых смесей получила широкое распространение в животноводстве, она предполагает интенсивное перемешивание кормовых компонентов, существенно различающихся по своим физико-механическим свойствам.

Дойные коровы (живая масса 600 кг, удой 20-25 л/сутки) относятся к категории высокопродуктивных животных. Их рацион должен обеспечивать высокую концентрацию обменной энергии и перевариваемого протеина при сохранении нормальной рубцовой ферментации.

На основе проведенного анализа по кормлению сельскохозяйственных животных [4, 12, 13, 17, 58, 79, 82, 93, 95, 103, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 146] определен состав кормовой смеси для крупного рогатого скота для дойных коров и молодняка в откорме (рис. 1.7, рис. 1.8), в том числе на рисунке 1.9 представлен

средний рацион для крупного рогатого скота (в процентах от общей физической массы).



Рисунок 1.7 – Рацион для дойной коровы (живая масса 600 кг, удой 20-25 л/сутки)

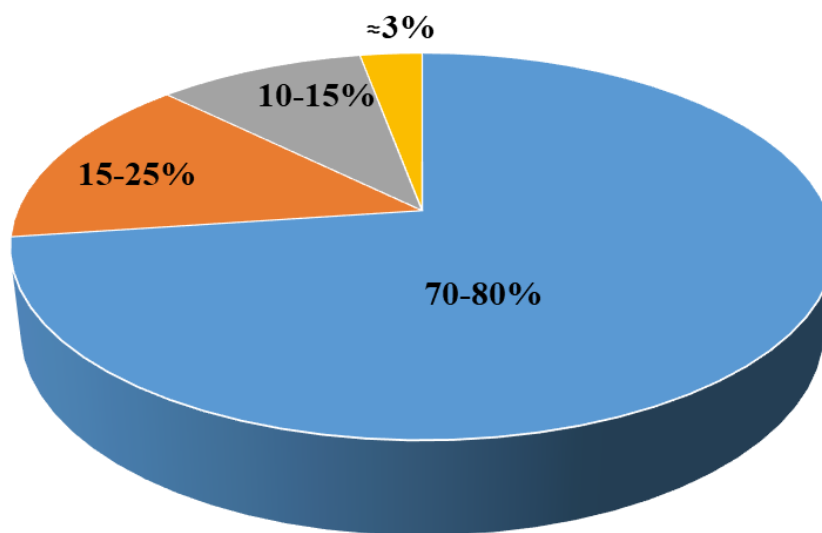
Рацион для дойной коровы с живой массой 600 кг и суточным удоём 20-25 л характеризуется сбалансированным соотношением объемистых и концентрированных кормов (рис. 1.7). Основу рациона (40-45% от сухого вещества) составляют сочные корма (силос кукурузный, сенаж), что обеспечивает высокую влажность и кислотность кормовой среды.

Грубые корма (сено, солома) занимают 25-30% и вносят волокнистую составляющую, повышающую сопротивление резанию.

Концентраты (зерновые, жмыхи, шроты) составляют 20-25%, добавляя абразивные частицы.

Минеральные и витаминные добавки – 1, 2%, создавая электролитическую среду.

Из-за обилия силоса (рН 3,3-4,3) в данном рационе присутствует высокая коррозионная агрессивность. Влажность кормосмеси высокая (65-75%), что усиливает транспорт кислот и абразивность.



% доля в рационе (от сухого вещества)

- концентраты (ячмень, пшеница, тритикале, кукуруза отруби)
- белковые корма - как часть концентратов (шрот подсолнечный, люпин, горох)
- грубые корма (сено, сенаж и др.)
- минеральные и витаминные добавки (соль, мел, фосфаты, примессы и др.)

Рисунок 1.8 – Рацион для молодняка на откорме (КР-3, возраст 116-400 дней)

Рацион для молодняка КРС на откорме (возраст 116-400 дней, рацион на основе комбикорма-концентрата КР-3) является высококонцентрированным. Концентраты (ячмень, пшеница, тритикале, кукуруза, отруби) занимают 70-80% от сухого вещества. Белковые корма (шрот подсолнечный, люпин, горох) указаны как часть концентратов и составляют 15-25%. Грубые корма (сено сенаж) – всего 10-15%, минеральные и витаминные добавки – около 3%.

Данный рацион создает преобладающую абразивную нагрузку, при этом коррозионная агрессивность ниже, чем в рационе дойной коровы, так как доля силоса меньше. Однако, повышенное содержание электролитов (минеральные добавки до 3%) в условиях даже умеренной влажности может усиливать локальную коррозию.

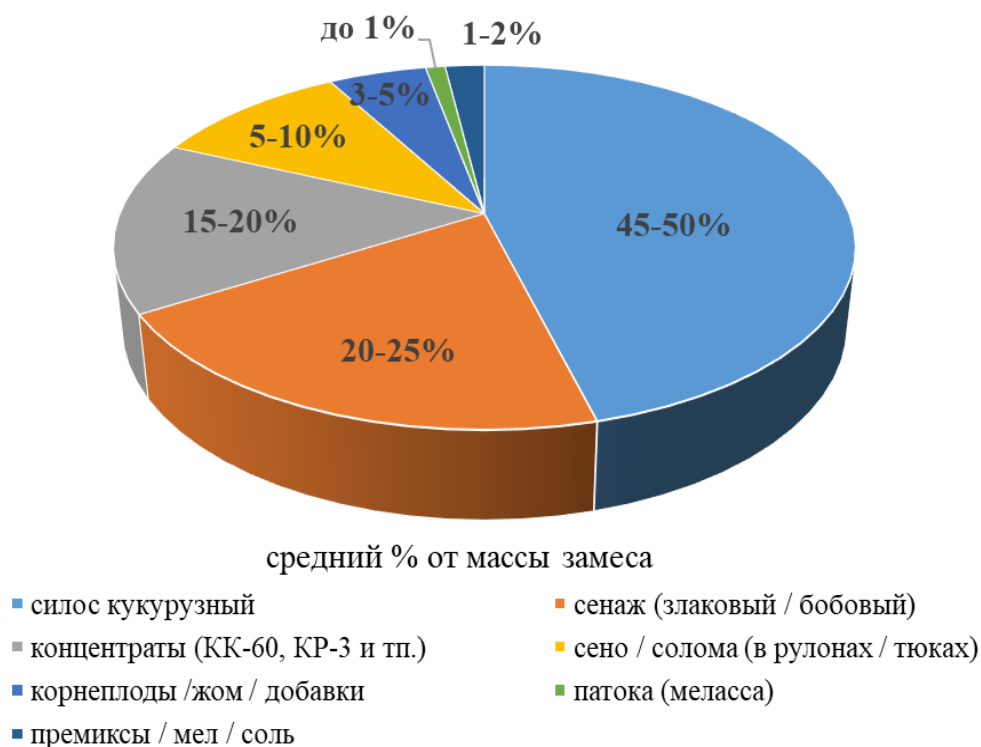


Рисунок 1.9 – Средний рацион для КРС (в процентах от общей физической массы)

На основе анализа рационов для крупного рогатого скота, определен средний рацион от массы замеса (рис. 1.9): силос кукурузный – 45-50%; сенаж (злаковый/бобовый) – 20-25%; концентраты (КК-60, КР-3 и т.п.) – 15-20%; сено / солома – 5-10%; корнеплоды / жом / добавки – 3-5 %; патока (меласса) до 1 %; премиксы / мел / соль – 1-2%.

Таким образом, проведенный анализ рационов для КРС, позволил определить условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков.

1.2.3. Условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков

Режущие элементы смесителей-кормораздатчиков эксплуатируются в кормовой массе. Проведенный анализ показывает, что кормовая среда представляет собой многокомпонентную гетерогенную систему, физико-механические свойства которой определяют интенсивность и механизм изнашивания контактирующих с ней металлических поверхностей.

Чтобы понять как кормовой рацион влияет на контактирующие с ним рабочие органы, рассмотрим физико-механические свойства кормов (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства кормов для КРС

Компонент корма	Геометрия частиц	Размер частиц, мм	Насыпная плотность, кг/м ³	Коэффициент внешнего трения о сталь	Угол естественного откоса, град.	Особые свойства
Силос кукурузный	резка (листья, стебли, початки)	10-30 (до 50)	200-400 рыхлая; 600-800 уплотненная	высокий	>50 (склонность к налипанию)	абразивность (содержание песка и почвы), кислотность (рН 3.8-4.2)
Сенаж	резка (листья, стебли)	до 30 (не менее 80% частиц)	200-450	средний	40-50	менее кислый, чем силос (рН 4.5-5.5) . Сочетает свойства сена и силоса.
Сено (измельченное)	волокниста (стебли)	10-50 (в зависимости от степени измельчения)	50-150 (россыпь)	средний / высокий (сухое трение)	45-55	гигроскопичность (активно впитывает влагу и разбухает).
Концентраты	сыпучая, гранулы / россыпь	гранулы: 4-6; россыпь: 0,5-3	500-700	средний	25-40	содержат твердые минеральные частицы (мел, соль, фосфаты до 3%) . Действуют как абразив.
Кормовые добавки	мелкодисперсный порошок / гранулы	0,1-2	400-800	высокий	25-40 (жом свекловичный может иметь более 40)	высокая абразивность (минеральная часть) и гигроскопичность. Могут быть химически активны (соли микроэлементов).
Солома измельченная	волокнистая, стебли, полая внутри	10-100	40-120	средний	>50 (склонность к налипанию)	абразивна из-за содержания кремнезема (SiO ₂) в клеточных стенках. Низкая насыпная плотность.

Все грубые и сочные корма (сено, солома, силос, сенаж) имеют волокнистую или резную форму с размерами от 10 до 100 мм. Такая геометрия создает высокое сопротивление резанию и приводит к ударно-усталостному изнашиванию ножей. Концентраты и добавки – сыпучие (0,5-3 мм) или гранулированные (4-6 мм) оказывают абразивное изнашивание, когда частицы перетираются о металлические поверхности режущих элементов.

Силос и сенаж имеют низкую насыпную плотность в рыхлом состоянии (200-450 кг/м³) но при уплотнении в бункере смесителя их плотность возрастает до 600-800 кг/м³. Это увеличивает нормальное давление на рабочие органы и, следовательно, увеличивается интенсивность абразивного изнашивания. При этом концентраты даже без уплотнения с высокой плотностью (500-700 кг/м³) обеспечивают постоянно высокое контактное давление.

Усредненный рацион КРС и их физико-механические свойства позволили определить количественные характеристики кормовой среды (рис. 1.10, рис. 1.11), формирующие условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков в зависимости от сезона (лето/зима).

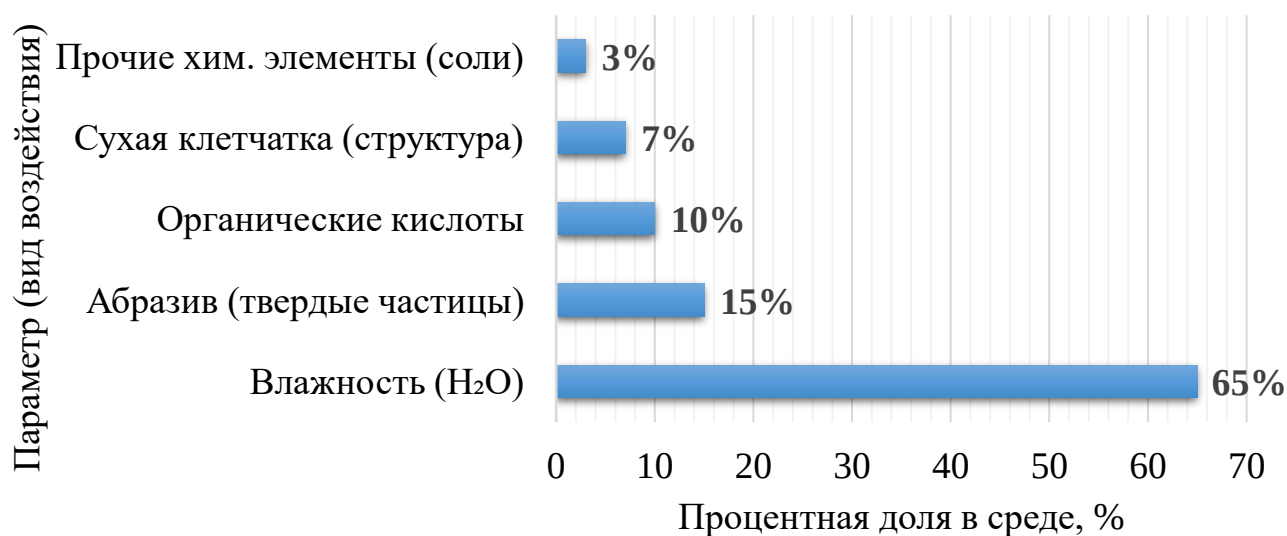


Рисунок 1.10 – Агрессивные факторы кормовой среды по данным усредненного рациона для КРС

Абразив является главным фактором механического износа режущих элементов.

Органические кислоты, присутствующие в кормовой среде, вызывают химическое разрушение (коррозию) металла, что ускоряет абразивный износ режущих элементов. Биохимические и микробиологические процессы, протекающие при силосовании кормов и приводящие к образованию молочной, уксусной и масляной кислот, подробно исследованы в работах McDonald P., Henderson A.R. и Heron S.J.E., [156, 162] а также Вайсбаха Ф. [163]. При этом масляная кислота выступает в качестве индикатора нежелательных процессов брожения кормов.

Волокнистая структура грубых кормов (клетчатка) создает ударные нагрузки и сопротивление резанию.

В работах Щеглова В.В. и Боярского Л.Г. [12, 13, 146] установлено, что влажность различных видов кормов существенно отличается: сена – 15-17%, сенажа – 50-60%, силоса – 65-80%, зеленой массы – 75-85%. Влажность определяет коррозионную активность и «вязкость» среды, служит транспортом для кислот и абразивов, а микроэлементы, содержащиеся в премиксах, усиливают электролитическую коррозию во влажной среде.

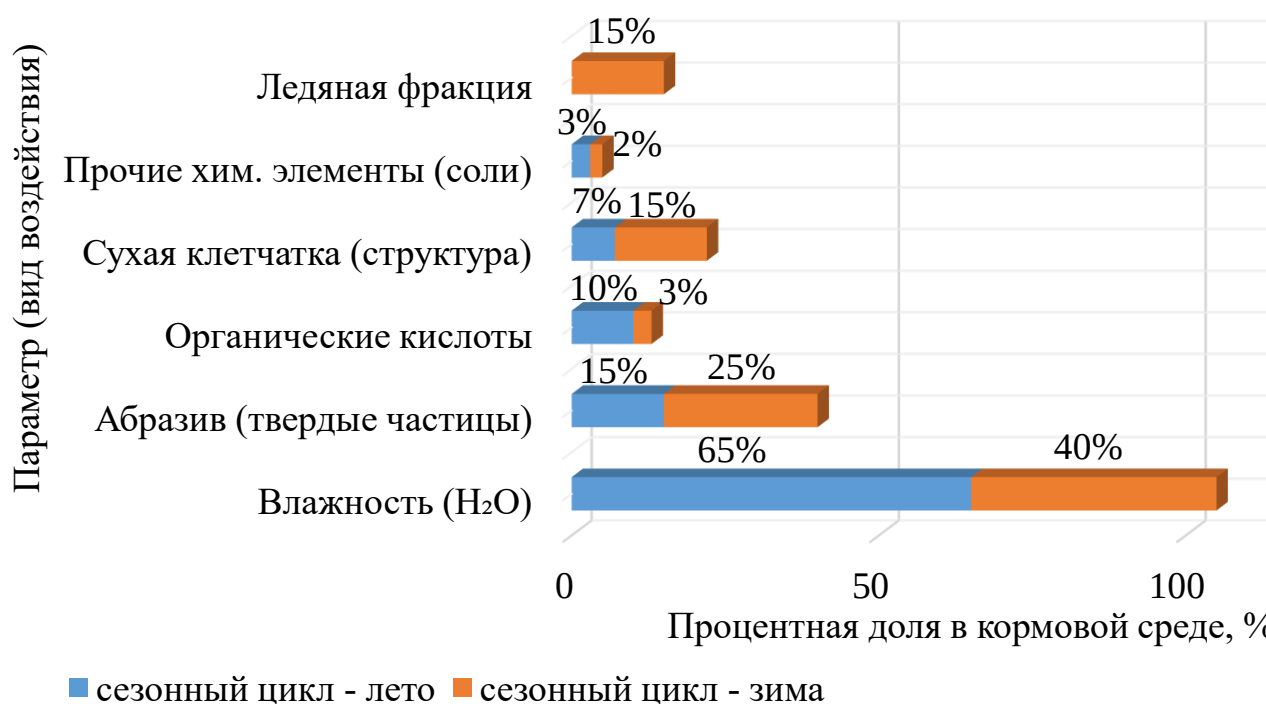


Рисунок 1.11 – Агрессивные факторы кормовой среды по данным усредненного рациона для КРС (с учетом сезонного цикла)

В зимний период эксплуатации смесителей-кормораздатчиков повышается абразивность из-за попадания в рацион ледяных фракций, что ускоряет износ рабочих органов в 1,5-2 раза.

Таким образом, условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков представляют собой сложный комплекс одновременно действующих абразивного, коррозионного и механического изнашивания.

1.2.4. Основные дефекты режущих элементов

Воздействия физико-механических и химических параметров кормовой среды (геометрия частиц, плотность и др.) а также условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков, в совокупности приводят к коррозионно-механическому изнашиванию (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов смесителей-кормораздатчиков



Продолжение рисунка 1.12 – Коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов смесителей-кормораздатчиков

Коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов смесителей-кормораздатчиков представляет комбинированный процесс, в котором в

зависимости от состава рациона, происходит абразивное затупление режущей кромки, коррозионное выкрашивание, усталостное скалывание.

Кроме физического износа, режущие элементы часто выбраковываются в результате излома и изгиба. На основе проведенного анализа частоты отказов режущих элементов смесителей-кормораздатчиков в сельскохозяйственных компаниях Московской, Тверской, Владимирской областях и в Республики Марий Эл, установлено, что наиболее распространенной причиной отказа режущих элементов при наработке в 300 моточасов является поломка (излом) ножа (59 %) и износ его режущей кромки (25 %), при этом у 10 % выявлены трещины в местах крепления, что в последующем приводит к излому ножа (рис. 1.13).

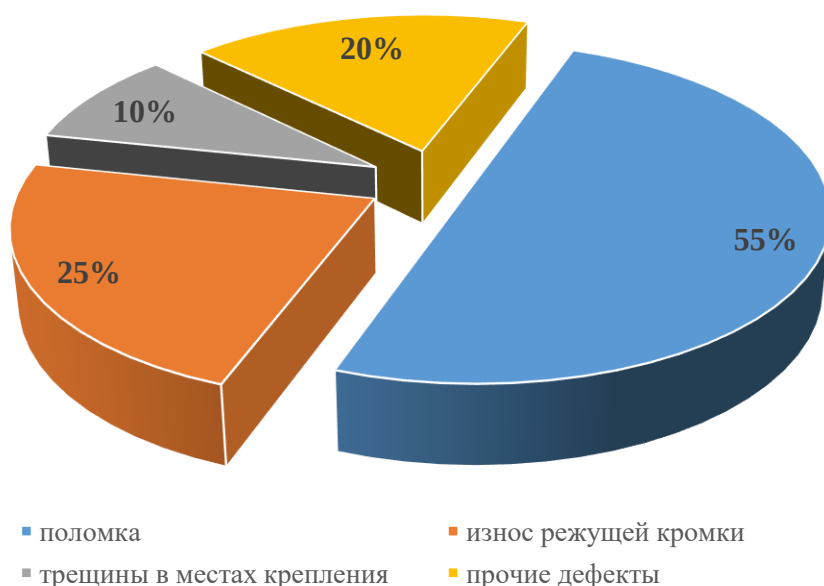


Рисунок 1.13 – Анализ доли отказов ножей смесителей-кормораздатчиков при наработке в 300 моточасов

Помимо особенностей среды эксплуатации, к основным причинам коррозионно-механического изнашивания рабочих органов смесителей-кормораздатчиков следует отнести несоответствие геометрическим и физико-механическим параметрам при их изготовлении.

1.3. Анализ методов и средств испытания рабочих органов сельскохозяйственных машин

Большой вклад в изучение вопросов изнашивания рабочих органов сельскохозяйственных машин и разработку мер по повышению их работоспособности и долговечности внесли следующие ученые: Бернштейн Б.Д. [10], Крагельский И.В. [83, 84, 85], Тененбаум М.М. [129], Хрущев М.М. [139], Бурченко П.М. [16], Винокуров В.Н. [18, 19], Виноградов В.Н., Голубев И.Г. [23, 24, 126], Левшин А.Г. [87], Ермолов Л.С. [59], Краснощеков Н.В., Севернев М.М. [73, 110], Новиков В.С. [94], Дж.Ф. Арчард [148, 149], Бойко А.И. [11], Казанцев С.П. [77, 78], Балабанов В.И. [9], Прокопцев П.И. [101], Рещиков В.Ф. [107], и многие другие ученые.

Теория резания и взаимодействия рабочих органов со средой представлена академиком Горячкиным В.П. [25, 26, 63, 143].

Повышению надежности сельскохозяйственной техники посвящены научные труды ученых: Черноиванова В.И. [141, 142], Ерохина М.Н. [61, 62, 64, 66], Измайлова А.Ю. [72], Дидманидзе О.Н. [50, 130], Дорохова А.С. [56], Гайдара С.М. [21, 22], Алдошина Н.В. [3], Лялякина В.П. [90, 124], Ишкова А.В. [75], Аулова В.Ф. [6, 7, 70], Андреева С.А. [5], Денисова В.А. [48, 49, 123], Федорова С.К. [20, 71, 131], Девянина С.Н. [47], Бугаева А.В. [14], Дородов П.В. [53, 54], Серова А.В. [111, 112], Серова Н.В. [113, 114], Петров В.А. [99, 100] и др.

Современные исследования по разработке новых методов и методик испытания деталей сельскохозяйственных машин и технологических процессов отражены в работах [51, 52, 80, 102, 121, 140].

Существует достаточно много различных методов и средств для испытания рабочих органов сельскохозяйственных машин, которые можно классифицировать по следующим признакам:

- по типу воздействия – методы, моделирующие только абразивный износ, только усталостное и только коррозионное воздействие либо их сочетание;

- по типу испытаний – лабораторные (на образцах свидетелях), стендовые (на натурных образцах), эксплуатационные (на конкретных машинах в реальных условиях);
- по режиму испытаний – непрерывный, прерывистый, ступенчатый с чередованием нормального и форсированного режима;
- по виду контролируемых параметров – потеря массы (гравиметрические), изменение геометрии (профилометрические), структурные изменения (металлографические), коррозионный анализ (глубина и площадь);
- по способу моделирования среды – испытания в реалистичных средах, в искусственных абразивных массах, в коррозионно-активных жидкостях, в комбинированных имитирующих субстрат.

Обобщенная классификация методов и средств испытания представлена на блок-схеме (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Классификация методов и средств испытания рабочих органов сельскохозяйственных машин

Учеными ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» С.А. Сидоровым, Д.А. Мироновым и И.В. Лискиным разработан **круговой**

почвенный стенд (патент RU № 2613292 C1), предназначенный для испытания в почве режущих элементов сельскохозяйственных машин [96].

Конструкция стенда (рис. 1.15) включает круговой почвенный канал, приводной механизм, уплотнительные катки с грузами, рыхлители почвенной массы, резервуар воды с капельницей для поддержания заданной влажности, а также два гнезда для одновременной установки эталонного и испытуемого образцов. Гнезда расположены под углом 35-45° к наружной стенке канала на расстоянии 1,5-1,7 м. друг от друга, что обеспечивает идентичные условия изнашивания для обоих образцов и повышает точность экспериментов на 10-15%. [96, 115].

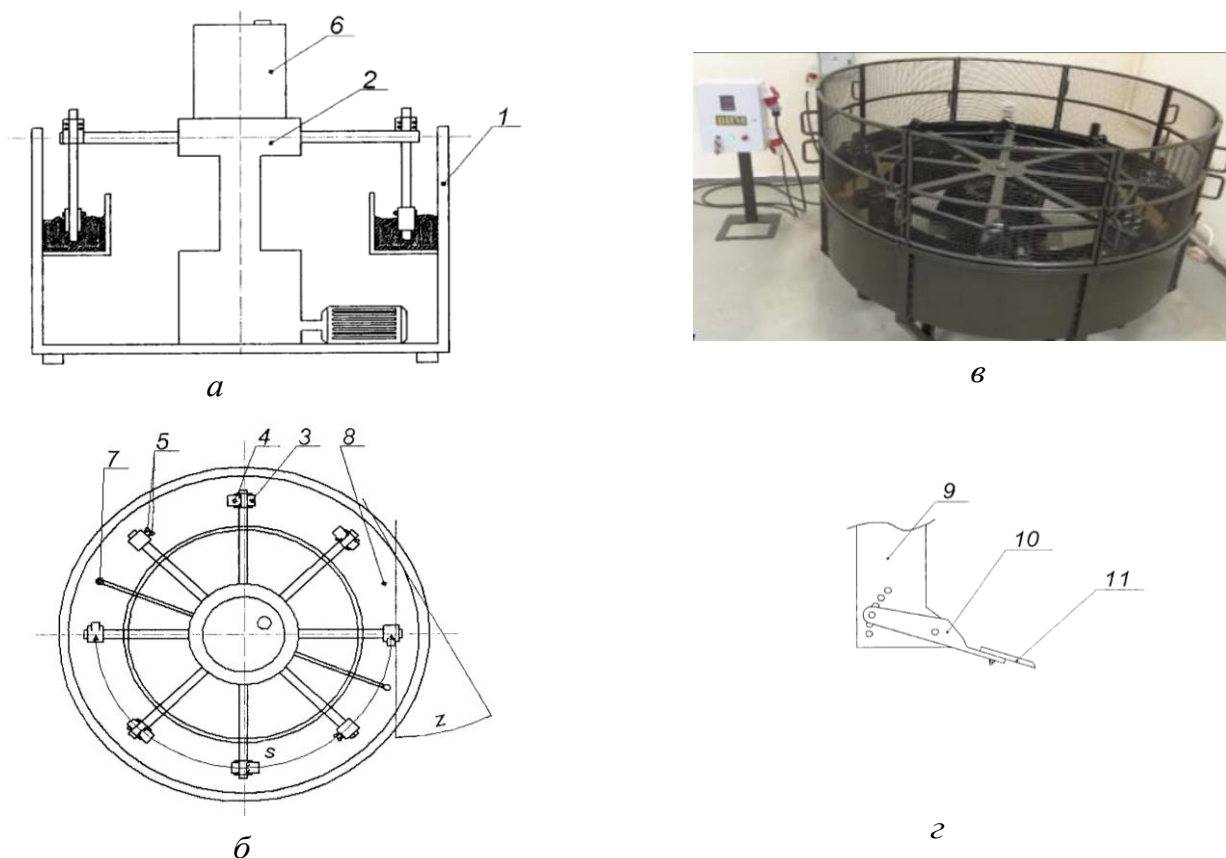


Рисунок 1.15 – Круговой почвенный канал [96, 88]: *а* – главный вид; *б* – вид сверху; *в* – общий вид; *г* – креплении образца; 1 – каркас; 2 – приводной механизм; 3 – уплотнительные катки; 4 – грузы; 5 – рыхлители почвенной массы; 6 – резервуар воды; 7 – капельницы; 8 – круговой почвенный канал; 9 – приспособление для установки испытуемого образца; 10 – гнездо; 11 – испытуемый и эталонный образцы

Круговой почвенный канал предназначен для оценки износостойкости материалов почворезущих элементов (лемехов, лап культиваторов и др.). По результатам испытаний в данном стенде установлено, что применение новых материалов (например: стали 50ХФА с твердым сплавом ПР-ФБЮ-1-4) позволяет повысить износостойкость в 2,9-3,5 раза по сравнению с эталонной сталью 65Г [88].

Основным недостатком данного метода испытания рабочих органов является то, что он ориентирован исключительно на испытания почворезущих элементов и отсутствие возможности испытания режущих элементов, измельчающих кормовую среду.

Учеными ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет» В.А. Шаховым, В.С. Колядой и И.М. Затиным разработана **установка для исследования на абразивный износ рабочих органов молотильного аппарата зерноуборочных комбайнов** (патент на полезную модель RU 176679 U1) [98].

Конструкция установки (рис. 1.16) включает цилиндрический корпус с загрузочным окном, рабочий вал с закрепленным в нем бичами, электродвигатель с клиноременной передачей, а также устройство для подачи абразивной массы (песок зерновая пыль). Внутренняя поверхность корпуса выполнена рифлёной для создания дополнительного абразивного воздействия на испытываемые образцы. Испытания проводятся при частоте вращения ротора 800-1200 мин⁻¹, что соответствует реальным режимам работы молотильного аппарата [98].

Данная установка позволяет проводить испытания на абразивное изнашивание по методике, регламентированной ГОСТ 23.208-79. Износостойкость оценивается по потере массы образцов, с определением относительной износостойкости. При этом данная методика предназначена для сравнительной оценки материалов, работающих в абразивных средах, не учитывает коррозионное воздействие и не позволяет моделировать условия эксплуатации в животноводстве.

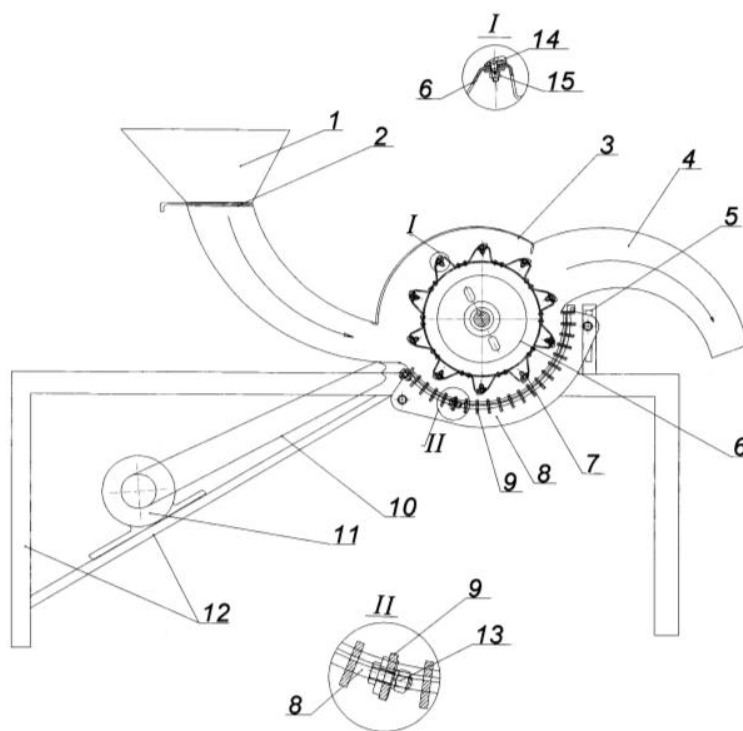


Рисунок 1.16 – Схема установки для исследования на абразивный износ рабочих органов молотильного аппарата зерноуборочных комбайнов [98]:

1 – загрузочный бункер; 2 – задвижки; 3 – корпус обмолачивающего устройства; 4 – выгрузной рукав; 5 – планки наклона; 6 – барабан молотильного устройства; 7 – рабочие органы; 8 – съёмные деки; 9 – планки подбарабання; 10 – ременная передача; 11 – электродвигатель; 12 – рама; 13, 15 – болтовое соединение; 14 – испытываемые планки

Основным недостатком данной установки является ее специализация на испытания рабочих органов молотильного аппарата зерноуборочных комбайнов, что ограничивает ее применение.

В зарубежной практике, для оценки износостойкости материалов, в частности полимерных композиций, применяются **устройство для измерения истираемости образцов** (патент US6412330B1) учеными Paul Thomas Dicello, Ravindra Kulasekere, Robert Edward Daly, Jr компании The Goodyear Tire & Rubber Company (США) [154]. Устройство предназначено для измерения истираемости образцов при контролируемых параметрах нагрузки, скорости и температуры, что позволяет моделировать реальные условия эксплуатации исследуемых материалов.

Конструктивно устройство включает (рис. 17) вращающийся абразивный диск или ленту с заданной шероховатостью, держатель образца с системой прижатия, обеспечивающей регулируемое усилие контакта (диапазон нагрузок от 5 до 200Н) а также датчики контроля температуры и силы трения. Скорость вращения абразивного диска варьируется в пределах 50-500 мин⁻¹, что позволяет моделировать различные кинематические условия изнашивания [154].

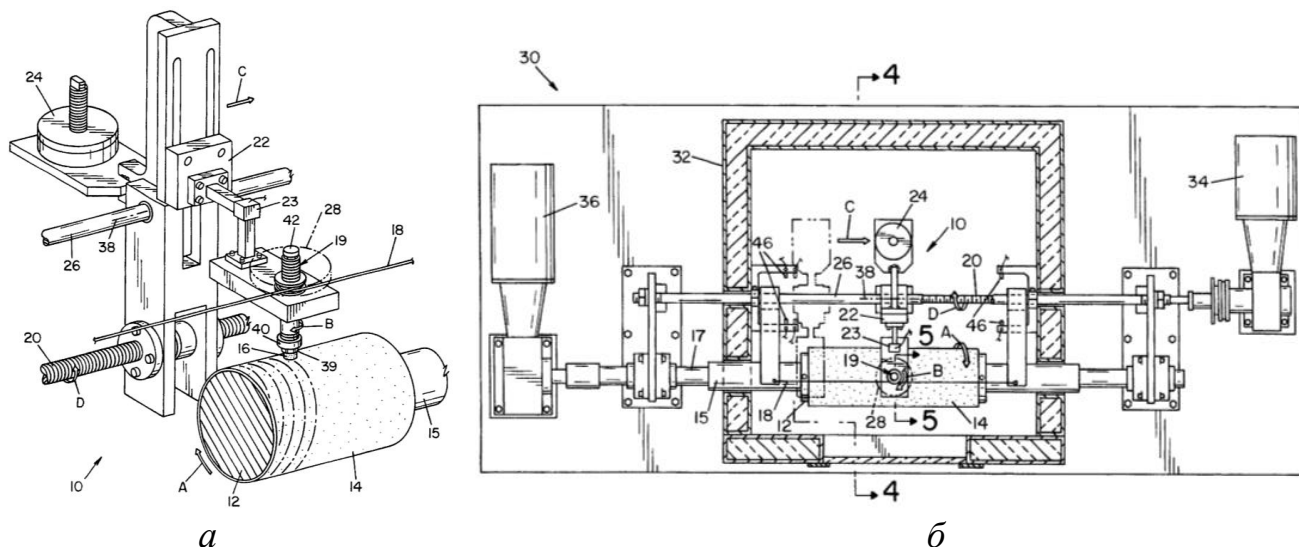


Рисунок 1.17 – Общий вид устройства [154]: *а* – часть устройства для переноса образца; *б* – вид устройства сверху в разрезе; 12 – барабан; 14 – абразивная поверхность; 15 – рукав; 16 – испытуемые образцы; 17 – ось; 18 – кабель; 19 – шпиндель; 20 – резьбовой винт; 22 – держатель образцов; 23 – датчик веса; 24, 28 – вес; 26 – вал; 34, 36 – двигатели; 32 – экологическая камера; 38 – точка вращения; 39 – цанга; 40 – цанговая гайка; 42 – регулируемый винт; 46 – датчик освещенности

Износостойкость оценивается по потере массы образца за фиксированное количество циклов истирания (1000, 5000 или 10000 циклов) или по измерению глубины дорожки износа. Точность измерений обеспечивается использованием прецизионных весов с погрешностью $\pm 0,1$ мг и оптических методов контроля геометрии.

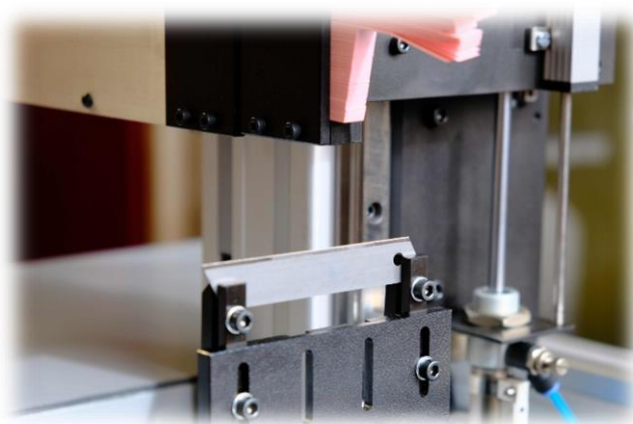
Основным недостатком данного устройства применительно к задачам, которые выполняют детали животноводческого оборудования является ориентация

на испытания полимерных материалов и условия сухого трения, отсутствие возможности моделирования влажных сред, в том числе содержащих органические кислоты, а также ограниченный диапазон варьирования абразивных частиц (используется стандартный абразив). Кроме того, устройство не позволяет проводить испытания одновременно нескольких образцов в идентичных условиях, что снижает эффективность эксперимента.

Британской компанией CATRA (Cutlery & Allied Trades Research Association) разработан **полуавтоматический тестер режущих кромок (SAET)**, предназначенный для оценки остроты и износостойкости лезвий (рис. 18) [153].



а



б

Рисунок 1.18 – Полуавтоматический тестер остроты режущих кромок (<https://www.catra.org>) [153]: *а* – общий вид; *б* – вид держателя образца

Установка широко используется для испытания ноже и режущих элементов, в том числе и сельскохозяйственных машин [153, 46].

Конструкция тестера включает: держатель образца, обеспечивающий вертикальную установку режущей кромки; механизм подачи пакета синтетической бумаги с содержанием кремнезема (SiO_2) – 5%, который оказывает абразивное воздействие на режущую кромку; привод возвратно-поступательного движения с

фиксированной скоростью резания – 50 мм/с; систему измерения глубины реза на каждом ходе; нагрузочное устройство, обеспечивающее усилие контакта 50Н [153].

Износостойкость оценивается по кривой износа лезвия, построенной на основе глубины реза на каждом ходе. Данный метод исследования соответствует международному стандарту испытаний на резку BS EN ISO 8442-5: 2004.

Основным недостатком установки является проведение испытаний в сухой абразивной среде (специальная бумага) без моделирования коррозионного воздействия и влажности. Кроме того, фиксированная скорость резания и нагрузка не позволяют варьировать режимы испытаний в зависимости от условий эксплуатации, а используемый абразив не воспроизводит волокнистую структуру и химический состав кормовых сред.

Японским изобретателем Кейги Создзима (啓義 副島啓義 副島) разработано **устройство для испытания образцов на трение и износ** (патент JP5655531B2), предназначенное для оценки типологических свойств материалов [164]. Устройство широко используется в промышленности для оценки износостойкости металлических и полимерных материалов, а также для оценки эффективности использования смазочных материалов и покрытий.

Конструкция устройства (рис. 1.19) включает: механизм создания контролируемой нагрузки на испытуемый образец; привод возвратно-поступательного или вращательного движения с регулируемой скоростью; датчики измерения силы трения, крутящего момента и температуры в зоне контакта; систему подачи смазочного материала; устройство для регистрации и обработки данных в реальном времени.

Преимуществом данного устройства является проведение испытаний в различных режимах (возвратно-поступательное, вращательное движение) с одновременной регистрацией нескольких параметров (сила трения, температура, момент) что позволяет комплексно оценивать трибологические характеристики материалов.

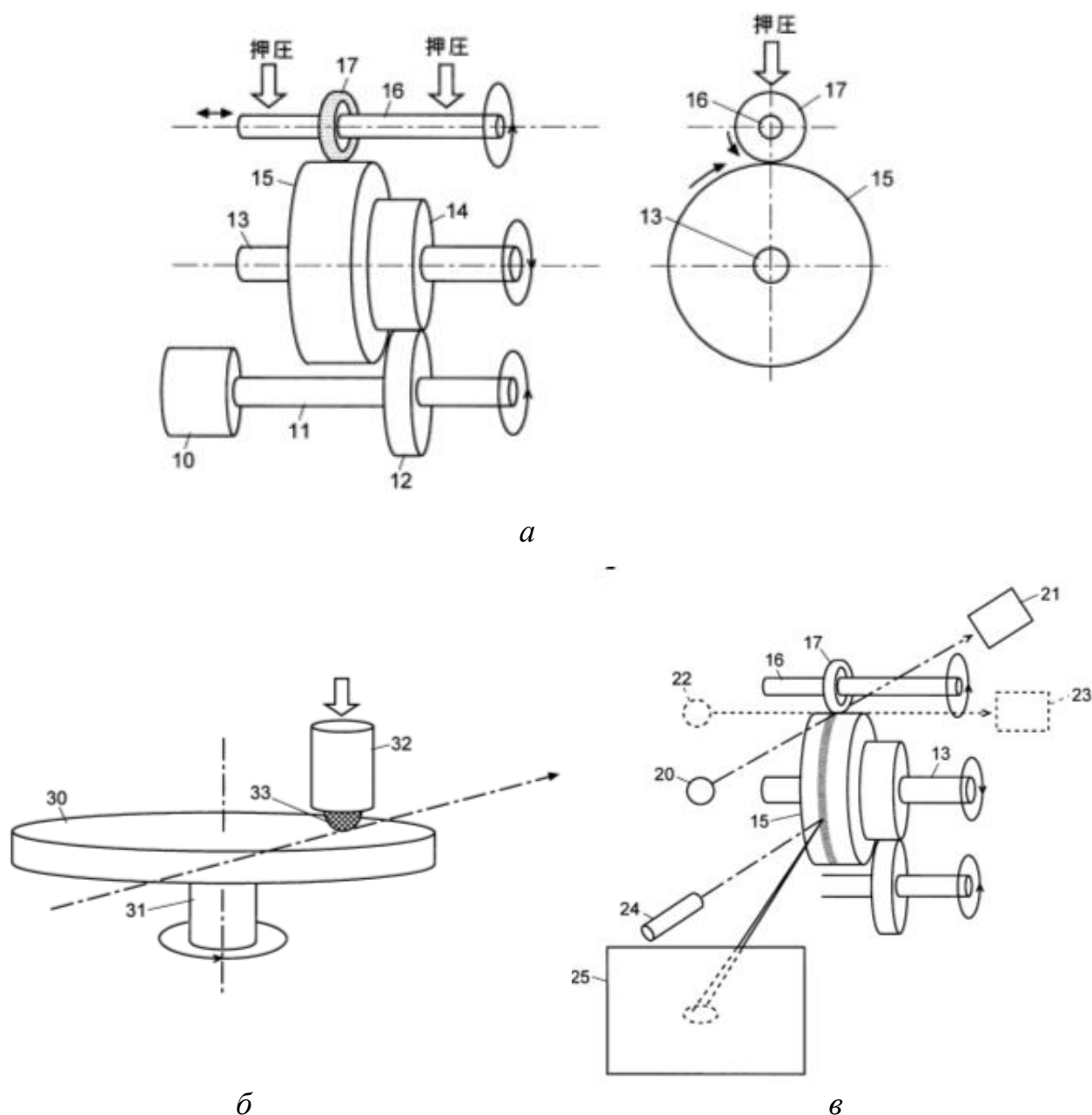


Рисунок 1.19 - Устройство для испытания образцов на трение и износ [164]:

а, в – общие схемы установки; б – схема принципа работы

Недостатками данного устройства являются: испытания проводятся только на образцах свидетелях, проведение испытаний преимущественно в сухой среде или в присутствии смазочных материалов.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы» [31]. Стандарт распространяется на металлические материалы и металлические покрытия и

устанавливает метод их испытаний на абразивное изнашивание при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы.

Сущность метода заключается в том, что при одинаковых условиях проводят трение образцов исследуемого и эталонного материалов об абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся резиновым роликом. Износ образцов измеряют путем их взвешивания на высокоточных весах, а износостойкость оценивается путем сравнения износа исследуемого материала с износом эталонного образца.

Конструкция испытательной установки на абразивный износ (рис. 1.20) включает: привод, обеспечивающий вращение вокруг горизонтальной оси резинового ролика; образцедержатель для закрепления образца; рычаг, прижимающий образец к ролику с усилием ($44,1 \pm 0,25$ Н); устройство, дозирующее подачу абразивных частиц в зону трения; устройство для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытания.

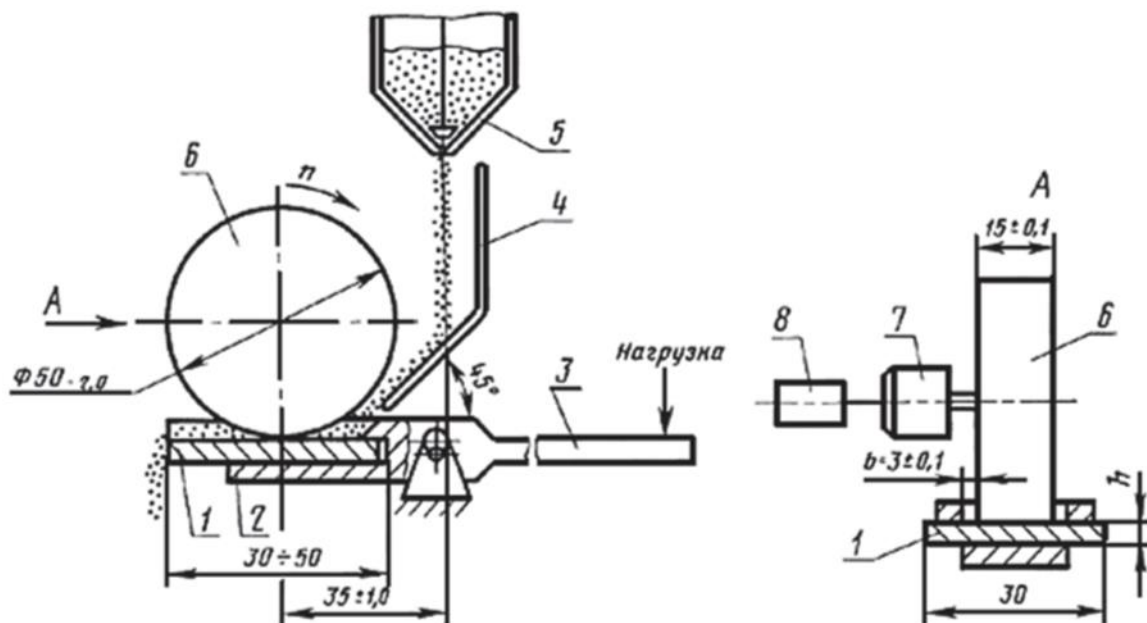


Рисунок 1.20 – Схема испытательной установки на абразивный износ [31]:

1 – испытуемый образец; 2 – образцедержатель; 3 – рычаг; 4 – направляющий лоток; 5 – устройство дозирования абразивного материала; 6 – резиновый ролик; 7 – привод; 8 – устройство для контроля суммарного количества оборотов ролика в процессе испытания

В качестве абразивного материала используется электрокорунд, зернистость которого подбирается в зависимости от твердости испытуемых образцов, при этом относительное содержание влаги в нем не превышает 0,15%. Повторное использование этого материала не допускается.

Образцы исследуемых и эталонных материалов изготавливают в виде пластин шириной 30 мм, длиной 30-50 мм и толщиной не менее 1 мм. Износостойкость оценивается по потере массы образцов с последующим вычислением относительной износостойкости.

Потеря массы образцов исследуемого материала определяется [31]:

$$\bar{g}_э = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{эi}}{3}, \quad (1.1)$$

$$\bar{g}_и = \frac{\sum_{i=1}^3 g_{иi}}{m}, \quad (1.2)$$

где $g_{эi}$, $g_{иi}$ – значения потерь массы при испытаниях эталонных образцов и образцов исследуемого материала, г.; m – количество образцов исследуемого материала.

Относительная износостойкость ($K_и$) исследуемого материала:

$$K_и = \frac{\bar{g}_э \rho_и N_и}{\bar{g}_и \rho_э N_э}, \quad (1.3)$$

где $\rho_э$, $\rho_и$ – плотности эталонного и исследуемых материалов, г/см²; $N_э$, $N_и$ – количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого материалов.

Недостатками данного метода являются: 1. Использование стандартных образцов (пластин), отсутствие возможности использования реальных деталей; 2. фиксированные параметры нагружения, не позволяющие варьировать режимы испытаний в зависимости от условий эксплуатации; 3. Проведение испытаний в сухой абразивной среде, без моделирования коррозионного воздействия органических кислот; 4. Отсутствие возможности регулирования влажности.

Система нормативных документов в области коррозионных испытаний включает комплекс межгосударственных стандартов, устанавливающие факторы коррозионной агрессивности, методы их определения и классификацию.

ГОСТ 9.039-74 «Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы» [37]. Устанавливает факторы, параметры коррозионной агрессивности атмосферы, методы их определения и классификацию. Стандарт определяет следующие параметры: среднегодовую температуру воздуха, относительную влажность, скорость ветра, количества выпадения сернистого газа (SO_2), хлоридов и аммиака (NH_3), а также время увлажнения поверхности металла [37]. На основе этих параметров устанавливается степень коррозионной агрессивности атмосферы, которая классифицируется по типам атмосферы: сельская, промышленная, морская [43]. Данный стандарт является основополагающим для оценки коррозионной активности окружающей среды при проведении натурных испытаний.

ГОСТ 9.909-2023 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические, металлы и сплавы. Методы испытаний на климатических испытательных станциях» [40]. Сущность методов, установленных стандартом, заключается в экспонировании образцов на климатических испытательных станциях в различных климатических зонах (умеренный, тропический, морской климат) с последующей оценкой коррозионной стойкости по изменению массы, механических свойств (предел прочности, относительное удлинение, стрела прогиба) и внешнего вида образцов.

Стандарт устанавливает следующие методы испытаний:

- метод натурных испытаний – экспонирование образцов на открытых площадках под навесом и в закрытых помещениях в течении установленного срока (от 1 года до 10 лет);
- метод натурно-ускоренных испытаний – экспонирование образцов в специальных камерах или на стендах, позволяющих интенсифицировать воздействие коррозионных факторов при старении подобия натурным условиям;
- метод испытаний на образцах-свидетелях – одновременное экспонирование эталонных образцов в одинаковых условиях с известной коррозионной стойкостью для сравнительной оценки.

ГОСТ 9.054-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности» [38]. Стандарт предусматривает три метода ускоренных испытаний:

1. Метод испытаний в атмосфере повышенной влажности и температуры (метод А). Сущность метода заключается в выдерживании консервационных материалов, нанесенные на металлические пластинки, в атмосфере повышенных значений температуры и относительной влажности воздуха (температура 40-50°C, относительная влажность 95-100%) в течение 7-14 суток;

2. Метод испытаний в атмосфере сернистого ангидрида (метод Б). Испытания проводят циклами: семь часов - воздействие SO₂ в концентрации 0,015% объемных при температуре 40±2°C и относительной влажности 95-100%; 17 ч. – конденсация влаги на образцах. Общая продолжительность испытаний составляет от 3 до 10 циклов;

3. Метод испытаний в соляном тумане (метод В). Испытания проводят в камере соляного тумана (рис. 1.21) при температуре 35±2°C с распылением 5%-ного раствора хлористого натрия в течении 24-96 ч.;

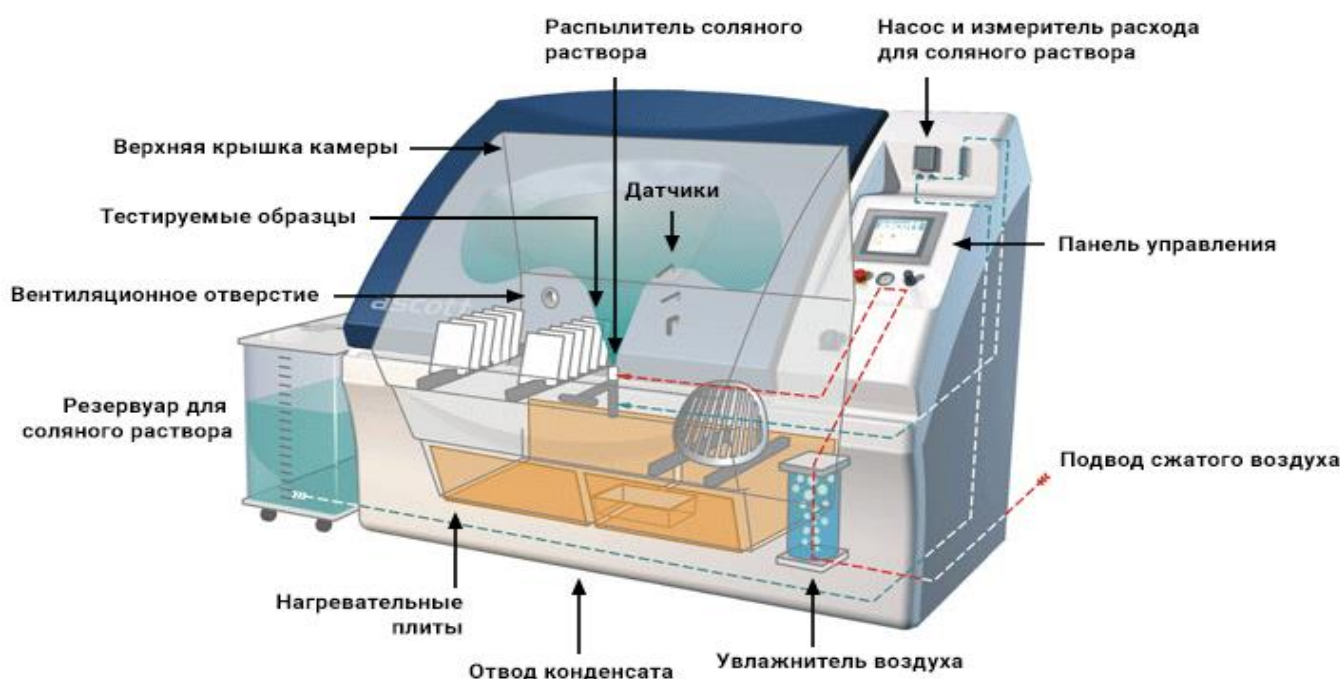


Рисунок 1.21 – Общий вид камеры соляного тумана (<https://labdepot.ru>)

Защитную способность консервационных материалов оценивают по среднему арифметическому значению результатов испытаний на параллельно испытываемых пластинках. Допускается также оценка по изменению массы пластинок за время испытаний с вычислением показателя коррозии (K):

$$K = \frac{P}{F}, \quad (1.4)$$

где P – изменение массы пластинки, г.; F – площадь поверхности пластинки, м².

ГОСТ 9.908-85 — межгосударственный стандарт, который называется «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости» [39] устанавливает основные показатели коррозии и коррозионной стойкости металлов и сплавов при различных видах коррозионных поражений, включая сплошную коррозию, питтинговую коррозию, межкристаллитную коррозию, расслаивающую коррозию, коррозию пятнами, коррозионное растрескивание и коррозионную усталость.

Определение показателей коррозии:

- потеря массы на единицу площади поверхности при сплошной коррозии:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{S}, \quad (1.5)$$

где m_0 – масса образца до испытаний, кг; m_1 – масса образца после испытаний и удаления продуктов коррозии, кг; S – площадь поверхности образца, м².

- степень поражения поверхности коррозионными пятнами:

$$G = \frac{\sum S_i}{S} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

где S_i – площадь i -го коррозионного пятна, мм²; n – количество пятен на поверхности; S – общая площадь поверхности образца, мм².

Также, ГОСТ 9.908-85 предусматривает металлографический метод оценки коррозионных поражений, включающий: определение и оценку типа коррозии; оценку формы коррозионного поражения и его распределения в материале; измерение глубины коррозионного поражения.

Общим недостатком рассмотренных нормативных документов в области коррозионных испытаний является их ориентация исключительно на оценку коррозионной стойкости материалов и покрытий в статических условиях или в условиях атмосферной коррозии, без учета одновременного механического воздействия (абразивного изнашивания).

Учеными Донецкого национального университета экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского И.Н. Заплентниковым, А.В. Шеиной и А.В. Гордиенко проведены **исследования процесса резания растительных материалов** [69]. Исследование направлено на изучение закономерностей взаимодействия режущих элементов с растительными материалами (стебле зерновых, травянистые культуры, кормовые растения) и разработку методов оценки эффективности резания. Авторы используют комплексный подход к изучению процесса резания растительных материалов, учитывая физико-механические свойства материалов, параметры режущего элемента и кинематические параметры процесса. Ими установлены зависимости между параметрами резания (скорость, угол заточки, усилие прижатия) и качество среза растительных материалов.

Исследования проводились на экспериментальном комплексе (рис. 1.22) состоящего из приводной части, узла резания и приборов для измерения, обработки и визуализации данных [69].

Учеными И.Н. Заплентниковым, А.В. Шеиной и А.В. Гордиенко установлено, что максимальные значения удельных усилий резания наблюдаются при рубящем резании, то есть при $\beta \rightarrow 0$. С увеличением угла резания происходит снижение удельных усилий резания в среднем в 1,5...2 раза до значения, обозначенного экстремумом функции, после чего удельные усилия резания возрастают. Оптимальные значения угла резания для исследуемой продукции находятся в интервале 25...40°, что соответствует минимальным усилиям резания [69]. Основным недостатком этого исследования является отсутствие учета изнашивания режущих элементов в процессе длительной эксплуатации и коррозионного воздействия органических кислот.

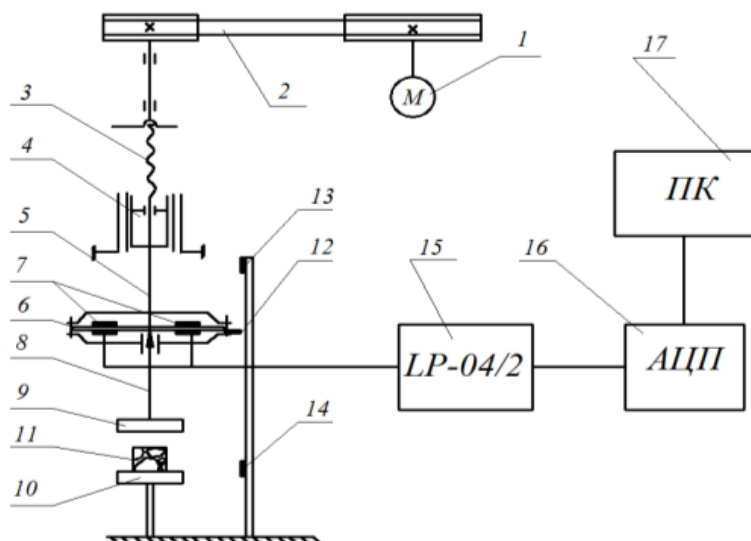


Рисунок 1.22 – Принципиальная схема экспериментального комплекса для исследования процесса резания [69]: 1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – винтовая передача; 4 – стакан; 5 – вал; 6 – балка; 7 – тензодатчики; 8 – шток; 9 – нож; 10 – стол-опора; 11 – продукт; 12 – рычаг; 13, 14 – верхний и нижний концевые выключатели; 15 – усилитель; 16 – аналого-цифровой преобразователь; 17 – персональный компьютер

Наиболее близким к рассматриваемой теме исследования является **«Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания режущих элементов в растительных средах. Методические указания. МУ 105-0-068–83»** разработанный учеными А.И. Бойко, П.И. Прокопцевым, М.Н. Ерохиным и Б.Д. Платоновым [11].

Сущность метода состоит в определении степени изнашивания лезвий растительной средой при осуществлении процесса резания в установленных режимах испытаний посредством измерения геометрических параметров лезвий методом снятия оттисков профиля контролируемых участков и последующим увеличением изображения оптическими приборами.

Испытания проводятся на стендовой установке для ускоренных испытаний образцов лезвий (рис. 1.23), обеспечивающая: резание растительной среды со скоростью, регулируемой в пределах от 5 до 80 м/с с погрешностью поддержания ее в процессе испытаний не более 5%; проведение испытаний лезвий в

растительных средах с фракционным составом частиц длиной от 15 до 300 мм при влажности от 10 до 90%; непрерывную регистрацию количества циклов нагружения образцов лезвий; коррозионно-механическое изнашивание образцов лезвий растительной средой.

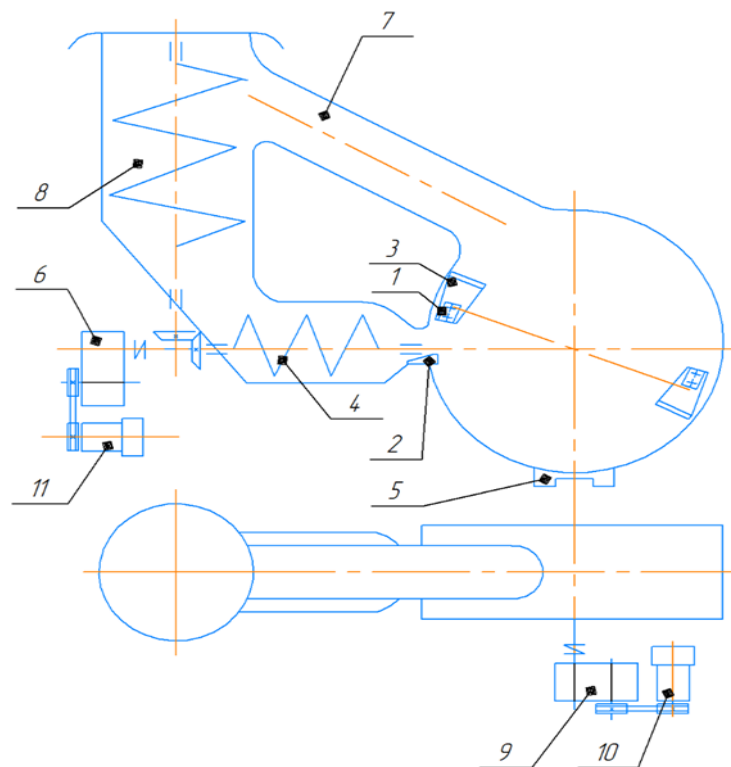


Рисунок 1.23 – Стеновая установка для ускоренных испытаний образцов лезвий представленная в МУ 105-0-068–83 [11]

Исследования проводятся в среде, близкой к среде эксплуатации режущих лезвий. Основной недостаток данной методики является отсутствие возможности испытания одновременно нескольких эталонных и экспериментальных режущих лезвий и не обоснован субстрат, имитирующий растительную среду.

Проведенный анализ показал, что существующие методы и средства испытаний не позволяют в полной мере моделировать коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов в условиях, приближенным к реальной эксплуатации смесителей-кормораздатчиков, большинство методов и средств не решают задачу исследования комплексно, что ограничивает их возможности. Для визуализации сравнительной характеристики рассмотренных методов составлена таблица основных их достоинств и недостатков (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики методов и средств испытаний

Параметр/Метод	ГОСТ 23.208-79 (абразив)	МУ 105-0-068–83 (расти. среда)	Комплекс для исследования процесса резания	Патент JP 5655531 B2	RU № 2613292 C1	RU 176679 U1	Патент US6412330 B1	Полуавтоматический тестер режущих кромок	Комплекс межгосударственных стандартов, устанавливающие факторы коррозионной агрессивности
Моделируемая среда	сухая абразивная (электрокорунд)	растительная (абразив)	растительные материалы (стебли, трава)	сухая или со смазкой	почвенная (абразив)	сухая абразивная			атмосферная
Коррозионный фактор	отсутствует	учитывается	отсутствует						учитывается
Влажность среды, %	не регулируется	10-90	не регулируется		регулируется	не регулируется			0-100 (атмосферная)
Абразивный компонент	электрокорунд	растительная среда		стандартный абразив	почва (естественная)	кварцевый песок	абразивный диск	ссинтетическая бумага с SiO ₂ – 5%	атмосферные загрязнители
Волокнистая структура	отсутствует	имитируется (стебли, трава)		отсутствует					
Тип образцов	плоские (свидетели)	режущие элементы растительной среды / кормовых компонентов		образцы - свидетели	почворежущие рабочие органы	рабочие органы молотильного аппарата зерноуборочных комбайнов	образцы - свидетели	режущие кромки рабочих органов	образцы – пластины (свидетели)
Одновременное сравнение образцов	отсутствует	два образца	отсутствует	отсутствует	возможно		отсутствует		возможно
Регулировка скорости	фиксированная (60 мин ⁻¹)	5-80 м/с	0,5-10 м/с	регулируется	2,2 м/с	800-1200 мин ⁻¹	50-500 мин ⁻¹	фиксированная (50 мм/с)	не предусмотрена
Контролируемые параметры	потеря массы	потеря массы, геометрия	усилие реза, качество среза	потеря массы, сила трения, температура	износ, силы резания	потеря массы	потеря массы, глубина дорожки	глубина резания	потеря массы, глубина коррозии, степень поражения
Критерии предельного состояния	не установлены								установлены
Учет ускорения испытаний	не предусмотрено								
Прогнозирование ресурса	не предусмотрено								

Проведенный анализ показал, что основными недостатками существующих методов и средств испытаний являются:

1. Отсутствие одновременного учета абразивного и коррозионного факторов;
2. Невозможность регулирования влажности и кислотной среды в диапазонах, характерных для кормовых смесей;
3. Отсутствие волокнистой структуры в имитирующей среде;
4. Невозможность одновременных сравнительных коррозионно-механических испытаний нескольких образцов с различными материалами и различными упрочняющими технологиями;
5. Отсутствие критериев предельного состояния исследуемых параметров и методик прогнозирования ресурса.

Таким образом, для оценки долговечности режущих элементов машин для животноводства с учетом комплексного подхода исследования коррозионно-механического изнашивания необходимо разработать новую методику ресурсных испытаний, учитывающую одновременное воздействие абразивных частиц, органических кислот, повышенной влажности, характерных для кормовых сред.

1.4. Требования к новой методике ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства

Проведенный анализ условий эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков [55, 57], состава кормовых смесей для крупного рогатого скота, а также методов и средств испытания рабочих органов позволили выявить недостатки существующих подходов и сформулировать требования к новой методике ресурсных испытаний режущих элементов. Новая методика должна:

1. Базироваться на принципах ускоренных ресурсных испытаний с возможностью форсирования режимов по концентрации абразива, кислотности и влажности среды;
2. Обеспечивать моделирование коррозионно-механического изнашивания, характерного для реальных условий работы режущих элементов в животноводстве;

3. Возможность использования имитирующего субстрата, состав которого воспроизводит физико-химические свойства кормовой среды, включая: наличие абразивных частиц; присутствие органических кислот; регулируемую влажность среды; волокнистую структуру;

4. Позволять регулировать основные эксплуатационные параметры: скорость резания, температуру среды, влажность среды;

5. Обеспечивать возможность одновременных сравнительных испытаний эталонных (импортных) и экспериментальных (отечественных) образцов в идентичных условиях;

6. Конструкция стендового оборудования должна позволять устанавливать режущие элементы различных геометрических форм (круглые, прямоугольные, треугольные), применяемые в смесителях-кормораздатчиках и других животноводческих машинах и обеспечивать безопасность проведения экспериментов;

7. Обеспечивать возможность обоснованного выбора материалов и упрочняющих технологий при импортозамещении режущих элементов животноводческих машин;

8. Включать комплексную систему оценки износа по следующим показателям: массовый износ (потеря массы образцов); геометрический износ (изменение толщины режущей кромки, угла заточки); коррозионное поражение (количество и площадь коррозионных пятен);

9. Утверждена и рекомендована к использованию в испытательных центрах, научно-исследовательских организациях и учебных заведениях.

Реализация сформулированных требований позволит создать научно обоснованную методику ресурсных испытаний, обеспечивающую оценку долговечности режущих элементов и способствующую импортозамещению рабочих органов машин для животноводства.

1.5. Основные выводы по первой главе. Цель и задачи исследования.

На основе проведенного анализа, представленного в первой главе, сформулированы основные выводы:

1. Оснащение отрасли животноводства на 2024 год является импортным и составляет 95% от общего количества, поставляемые рабочие органы также являются импортными. Санкции усложнили поставки и увеличили стоимость импортных запасных частей;

2. Более половины (55 %) машинно-тракторного парка эксплуатируется старше 10 лет, а затраты на его содержание превышают 12 %.

3. Рабочие органы машин для животноводства включены в перечень критической промышленной продукции в отрасли сельскохозяйственного машиностроения Российской Федерации на 2024 – 2026 годы, что подтверждает актуальность исследований.

4. Определено, что основу рациона для крупнорогатого скота составляет кукурузный силос (45–50 %), сенаж (20–25 %), концентраты (15–20 %), а также сено, солома, корнеплоды и добавки. Влажность смеси варьируется от 50 % (сенаж) до 85 % (зеленая масса), рН составляет 4,0–5,5, что соответствует кислой среде силоса.

5. Установлено, что условия эксплуатации режущих элементов смесителей-кормораздатчиков характеризуются комплексным коррозионно-механическим воздействием, обусловленным одновременным воздействием абразивных частиц, органических кислот и повышенной влажностью.

6. Установлено, что наиболее распространенной причиной отказа режущих элементов при наработке в 300 моточасов является поломка (излом) ножа (59 %) и износ его режущей кромки (25 %), при этом у 10 % выявлены трещины в местах крепления, что в последующем приводит к излому ножа.

7. Установлено, что основной недостаток существующих методов и средств испытания рабочих органов является отсутствие возможности проведения испытаний режущих элементов, работающих в кормовых средах, характерным для

животноводства и невозможность моделировать коррозионно-механическое воздействие и испытывать одновременно несколько рабочих органов в одинаковых условиях.

Целью диссертационного исследования является разработка методики ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, позволяющей прогнозировать их долговечность и обоснованно выбирать материалы и упрочняющие технологии.

Для достижения поставленной цели исследования предусмотрено решение следующих основных задач:

1. Провести аналитический обзор условий эксплуатации рабочих органов машин для животноводства и анализ методов и средств их испытаний на коррозионно-механическое изнашивание;

2. Обосновать состав имитирующего субстрата, обеспечивающего коррозионно-механический характер изнашивания, и позволяющего максимально приблизить условия лабораторных исследований к реальным эксплуатационным нагрузкам;

3. Разработать математическую модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания;

4. Разработать методику ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, включающую программу и последовательность проведения экспериментов, и разработать установку для ресурсных испытаний режущих элементов в условиях, приближенных к эксплуатационным;

5. Провести экспериментальные исследования коррозионно-механического изнашивания режущих элементов и установить влияние эксплуатационных факторов на их долговечность;

6. Выполнить оценку экономической эффективности применения разработанной методики.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ И МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОНАЩЕНИЯ ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Долговечность режущих элементов машин для животноводства является важным показателем надежности [86] сельскохозяйственной техники. Оценка долговечности возможна путем проведения ускоренных ресурсных испытаний, для проведения которых необходима специализированная установка. Такая установка разрабатывается с учетом конструктивных особенностей режущих элементов, а также состава субстрата, моделирующего реальные условия эксплуатации. Комплексное решение этих задач обеспечивает достоверность и воспроизводимость результатов ускоренных испытаний.

Для проведения теоретического исследования разработана блок-схема исследования, основу которой составляет: обоснование субстрата, формирование модели технического оснащения с обоснованием конструктивных параметров установки для ресурсных испытаний, теоретическое исследование прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания и обоснование критериев предельного состояния режущих элементов (рис. 2.1).

Первым этапом теоретических исследований является обоснование состава имитирующего субстрата, который должен воспроизводить физико-механические свойства реальных кормовых сред.

На основе анализа рационов крупного рогатого скота и литературных данных установлено, что кормовая среда характеризуется наличием абразивных частиц, органических кислот, волокнистой структуры и повышенной влажности.

Воспроизведение этих факторов в лабораторных условиях является необходимым условием для моделирования коррозионно-механического изнашивания режущих элементов.



Рисунок 2.1 – Блок-схема теоретического исследования

Вторым этапом является формирование модели технического оснащения установки для ускоренных испытаний режущих элементов, включающую в себя: формирование требований к установке, разработка принципиальной схемы, обоснование выбора комплектующих, обоснование конструктивных параметров и прочностной расчёт установки.

Третьим этапом является теоретические исследования прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания, выполненного на основе анализа фундаментальных исследований теорий абразивного изнашивания, коррозионной составляющей, резания сельскохозяйственных материалов и др. и разработку математической модели прогнозирования долговечности режущих элементов.

Заключительным этапом является обоснование критериев предельного состояния режущих элементов машин для животноводства для дальнейшего проведения экспериментальных исследований, которые позволят объективно фиксировать момент достижения режущими элементами предельного состояния и использовать разработанную математическую модель для прогнозирования долговечности.

Теоретические исследования позволяют продолжить разработку методики ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства и перейти к экспериментальной верификации полученных положений.

2.1. Обоснование параметров среды ускоренных испытаний режущих элементов

Для моделирования условий эксплуатации режущих элементов смесителей-кормораздатчиков необходимо воспроизвести в лабораторных условиях основные факторы, определяющие условия коррозионно-механического изнашивания: абразивное воздействие; коррозионное воздействие; ударно-усталостное воздействие.

На основе анализа научных трудов ученых Щеглова В.В., Боярского Л.Г., Кулаковского И.В., Кирпичникова Ф.С., Резника Е.И., Севернева М.И., Тененбаума М.М., MsDonalda P., Hendersona A.R., Фейсбаха Ф., и др., разработан состав субстрата, характерный для реальных кормовых сред и воспроизводящий коррозионно-механическое изнашивание. Субстрат включает в себя следующие компоненты: древесные опилки; кварцевый песок; органические кислоты (молочная, уксусная и масляная).

В качестве абразивного воздействия выбран **кварцевый песок** фракцией 0,1-0,25 мм (10% объема засыпаемой смеси). Кварцевый песок инертен и не вступает в реакцию с кислотами (за исключением фтороводородной и фосфорной кислот), сохраняя абразивные свойства в абразивной среде. По ГОСТ 22551-2019 нормируется содержание диоксида кремния в кварцевом песке SiO_2 - не менее 95 %, а его твердость составляет 7 по шкале Мооса, что обеспечивает воспроизводимость экспериментальных данных. Такая твердость обеспечивает абразивное воздействие на режущие элементы и упрочняющие покрытия.

Кварцевый песок активно используется для испытаний деталей сельскохозяйственных машин [161].

Его наличие 10% объема засыпаемой смеси обеспечивает форсирование режима испытаний, так как в реальных условиях содержания песка в кормах составляет 1-3%, а увеличение концентрации до 10% позволяет ускорить процесс изнашивания в 3-5 раз. При использовании в таком процентном соотношении отсутствует сепарация при вращении, а его равномерное распределение обеспечивается благодаря связующему элементу (опилки).

Таким образом, кварцевый песок оказывает абразивное воздействие, а выбранная его фракция 0,1-0,25 мм и процентное отношение от объема засыпаемой смеси - 10% является оптимальной концентрацией для форсирования абразивного изнашивания.

В качестве волокнистого компонента, имитирующего структуру грубых кормов, выбраны **древесные опилки** фракцией 3-5 мм, в количестве 25-40% объема бункера.

Опилки выполняют две ключевые функции: моделирование волокнистой структуры (создают сопротивление резанию) и связующую функцию.

Связующая функция древесных опилок обеспечивает удержание абразивных частиц песка, предотвращая их сепарацию и обеспечивает равномерное распределение в объеме бункера.

Выбор фракции 3-5 мм обусловлен тем, что при заготовке силоса и сенажа растительная масса измельчается до частиц длиной 3-5 см. Использование меньше частиц (<3 мм) не создают достаточное сопротивление резанию. Применение частиц более 5 мм допустимо, так как возникают ударные нагрузки, характерные для реальных условий, особенно когда в кормовую смесь попадают замороженные частицы.

Оптимальное количество смеси рекомендуется принимать в пределах 25-40% объема бункера. При 25% обеспечивается минимальная связующая способность, при 40% - максимальная плотность, при которой сохраняется подвижность смеси.

Органические кислоты, присутствующие в силосованных кормах, оказывают существенное коррозионное воздействие на металлы. Как отмечается в современных исследованиях [157, 158, 159] даже при относительно высоких значениях pH органические кислоты могут вызывать интенсивную коррозию углеродистых сталей, а механизмы этого процесса являются более сложными по сравнению с коррозией в сильных минеральных кислотах. Это обусловлено способностью недиссоциированных молекул органических кислот проникать через защитные слои и восстанавливаться на поверхности металла.

Для моделирования коррозионной агрессивности кормовых сред введены три органические кислоты: молочная, уксусная и масляная. Их выбор обусловлен ключевой ролью в биохимических процессах силосования, подробно представленных в научных трудах McDonald P., Henderson A.R., Фейсбаха Ф., и др. [156, 162].

Органические кислоты и их процентный объем, принятый в качестве имитирующего фактора коррозионной агрессивности кормовых сред:

молочная кислота (0,5-1% от воды) – моделирует качественный силос, вызывая электрохимическую коррозию металла. Химическая формула молочной кислоты:



Она является основным продуктом молочнокислого брожения в качественном силосе. Молочная кислота образуется при ферментации сахаров гомоферментативными молочнокислыми бактериями и обеспечивает быстрое подкисление массы, подавляя развитие нежелательной микрофлоры. В правильном заложенном силосе ее доля составляет 40-75% от суммы органических кислот [156].

уксусная кислота (1-3% от воды) – моделирует типичный силос, усиливая коррозионные воздействия. Химическая формула уксусной кислоты:



Она образуется в результате гетероферментативного брожения. В отличие от молочной кислоты, она обладает более выраженными противогрибковыми свойствами, повышает аэробную стабильность силоса. Диапазон 1-3% от воды охватывает как типичные значения для качественного силоса (1%), так и условия, характерные для силоса с повышенной влажностью или нарушенной технологией заготовки и хранения (3%). Согласно рекомендациям при заготовке основных кормов⁴, при влажности силосуемой массы более 80% содержание уксусной кислоты возрастает. Принятый диапазон (до 3%) позволяет фиксировать коррозионные процессы в ускоренных испытаниях, не выходя за пределы реальных возможных значений.

⁴ Источник: <https://sibagro.ru/articles/seno-senazh-silos/>

масляная кислота (0,1-0,5% от воды) – воспроизводит химический состав среды, соответствующий ранним этапам нежелательного брожения кормов, образуя питтинговую коррозию. Химическая формула масляной кислоты:



Она образуется при развитии маслянокислых бактерий, что часто связано с недостаточной трамбовкой массы, плохой герметичностью силоса или другими нарушениями технологического процесса. Высокое содержание масляной кислоты (более 30% от общего количества кислот) делает корм непригодным для скармливания животным, так как может вызвать у них различные заболевания. Выбранный диапазон (0,1-0,5% от воды) моделирует начальную стадию порчи кормов.

Влажность среды принимается в диапазоне 50-90%. Данный диапазон выбран на основе анализа реальной влажности кормовых компонентов. Влажность определяет коррозионную активность и «вязкость» среды, служит транспортом для кислот и абразивов, а микроэлементы, содержащиеся в премиксах, усиливают электролитическую коррозию во влажной среде.

Кислотность среды (pH) (4,0-5,5) – соответствует кислотной среде силоса, ускоряя анодные реакции.

Частота вращения режущих элементов (250-500 мин⁻¹), в 3-5 раз превышает частоту вращения шнековых рабочих органов смесителей-кормораздатчиков, что обеспечивает форсирование испытаний.

Таким образом, выбранные параметры среды ускоренных испытаний, при разработке новой методики для ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства представлены на рисунке 2.2.

Параметры среды ускоренных испытаний

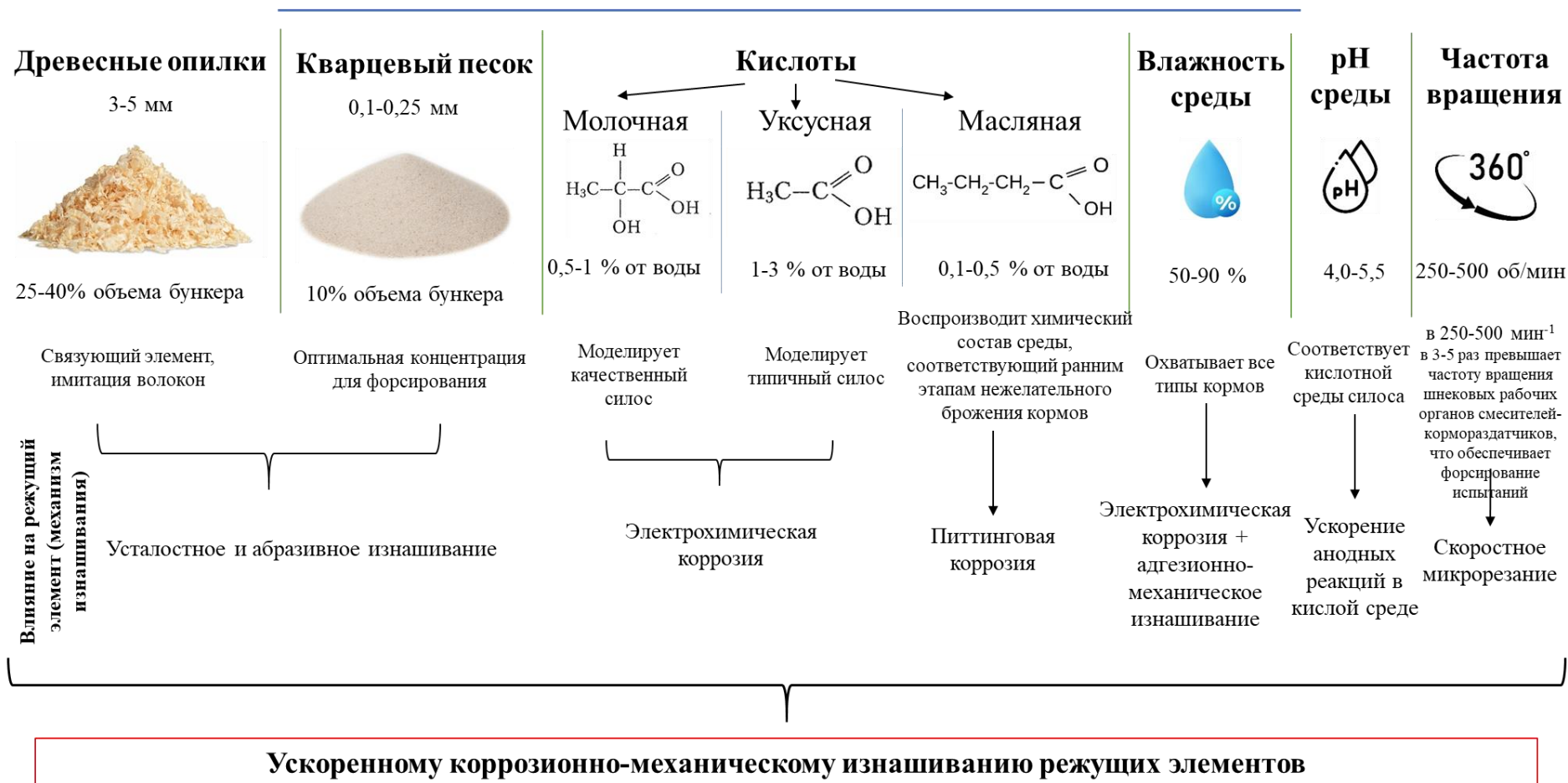


Рисунок 2.2 – Параметры среды ускоренных испытаний

Совместное действие абразивного и коррозионного факторов в предложенной среде адекватно моделирует реальные условия эксплуатации режущих элементов животноводческих машин.

2.2. Формирование модели технического оснащения установки для ускоренных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов машин для животноводства

Проведенный анализ существующих технических решений по ускоренным ресурсным испытаниям на абразивный и коррозионный износ деталей сельскохозяйственных машин, в различных условиях эксплуатации, послужил основой для формирования технического оснащения разработанной принципиальной схемы установки (рис. 2.3), предназначенной для ускоренных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов машин для животноводства.

Разрабатываемая установка позволит проводить испытания ножей смесителей-кормораздатчиков на коррозионно-механическое изнашивание следующим образом: испытуемые ножи 11 при помощи болтового соединения 10 неподвижно закрепляются на держателях 9, соединённых с валом установки 6. Опорами вала являются подшипники 7, запрессованные в корпусе 8. Приводной механизм 14 установлен на раме привода 15 и включает в себя клиноременную передачу 16 и электродвигатель 17. Через загрузочное окно 12 загружается абразив с жидкими кормовыми добавками. Запускают приводной механизм 14, электродвигатель 17 передает крутящий момент на рабочий вал установки 6, за счет клиноременной передачи 16. Частотный преобразователь 18, позволяет регулировать частоту вращения вала электродвигателя 17 и рабочего вала установки 6. Испытуемые рабочие органы 11 вращаются, согласно заданной методике. Для контроля уровня влажности в корпус установки 1 встроен датчик влажности 13. Управлять установкой возможно через его модуль управления 19.

Смена абразива происходит через выгрузное окно 20. Корпус установки 1 оснащен колесными опорами 2, позволяющими передвигать установку по опоре 3.

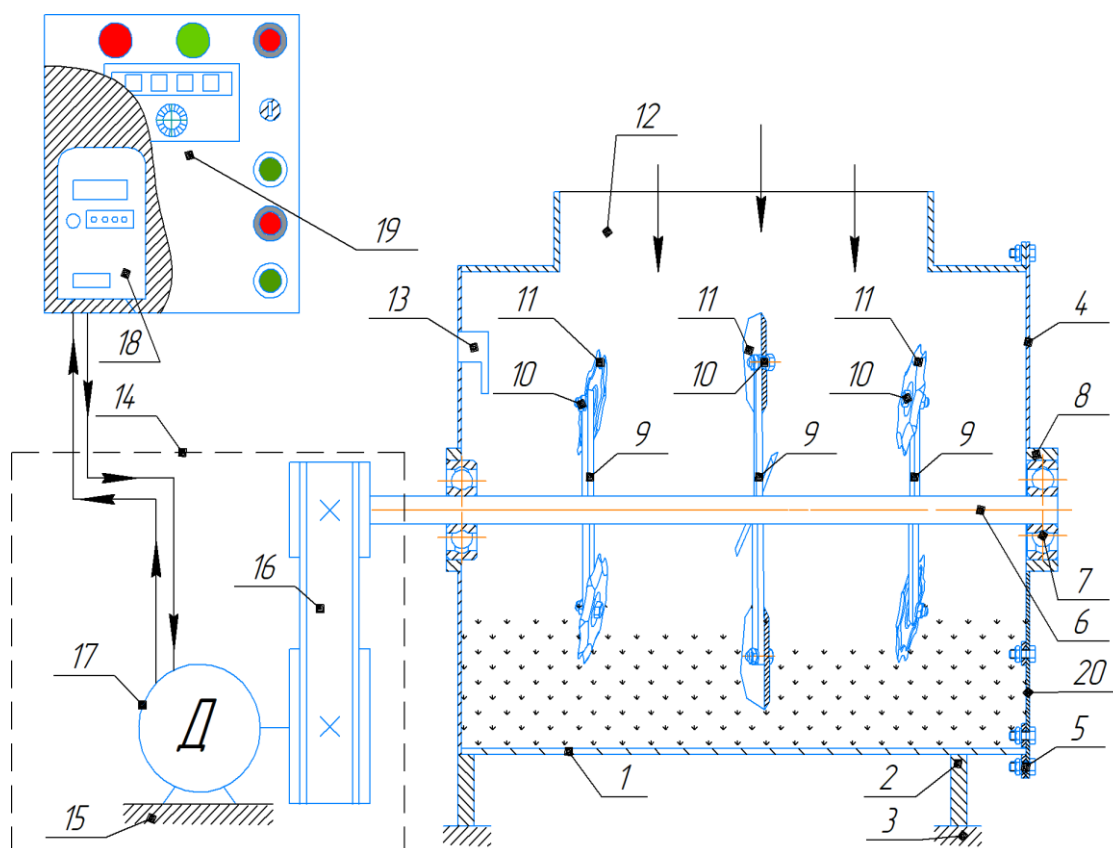


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема установки для ускоренных испытаний режущих элементов машин для животноводства:

1 – корпус; 2 – стойка; 3, 15 – опора; 4 – крышка; 5, 10 – болтовое соединение; 6 – вал; 7 – подшипник качения; 8 – втулка; 9 – держатель; 11 – испытываемые режущие элементы; 12 – загрузочное окно; 13 – датчик влажности; 14 – приводной механизм; 16 – ременная передача; 17 – электродвигатель; 18 – частотный преобразователь; 19 – модуль управления; 20 – выгрузное окно

Ключевой особенностью разрабатываемой установки является возможность ускоренных испытаний одновременно до 12 режущих элементов в одинаковых условиях их испытаний. Наличие частотного преобразователя позволяет задавать увеличенную частоту вращения испытываемых ножей по сравнению с вращением на сельскохозяйственной машине.

Крутящий момент на рабочем валу установки определяется следующим образом [60]:

$$T_{\text{рв}} = \frac{9550 \cdot N \cdot \eta_{\text{рп}}}{n_2} \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.4)$$

где 9559 – коэффициент перевода единиц измерений; N – мощность двигателя, кВт;
 $\eta_{\text{рп}}$ – КПД ременной передачи; n_2 – частота вращения рабочего вала, об/мин.

Диаметр конца рабочего вала по крутящему моменту и пониженному допускаемому напряжению на кручение [60]:

$$d_{\text{рв}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot T_{\text{рв}}}{0,2 \cdot [\tau]}} \text{ мм}, \quad (2.5)$$

где $[\tau]$ – допускаемое напряжение на кручение, МПа. Для валов из низкоуглеродистых сталей $[\tau]=10 \dots 20$ МПа.

Для соединения и передачи крутящего момента с ведомого шкива на вал установки используется стандартная шпонка, ее работоспособность проверяем на смятие и срез⁵ [60]:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{4 \cdot k_A \cdot M_{\text{рв}} \cdot 10^3}{d_{\text{рв}} \cdot h \cdot (l-b)} \leq [\sigma_{\text{см}}], \quad (2.6)$$

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot k_A \cdot M_{\text{рв}} \cdot 10^3}{d_{\text{рв}} \cdot b \cdot (l-b)} \leq [\tau_{\text{ср}}]; \quad (2.7)$$

где $[\sigma_{\text{см}}]$ – допускаемое напряжение смятия, МПа. $[\sigma_{\text{см}}] = 80 \dots 150$ МПа;

$[\tau_{\text{ср}}]$ – допускаемое напряжение среза, МПа. $[\tau_{\text{ср}}] = 70 \dots 100$ МПа;

k_A – коэффициент динамической нагрузки. $k_A=1,5$.

b, h, l – ширина, высота, длина шпонки, мм.

В качестве исходных параметров для проектирования схемы установки приняты следующие требования: наличие силовой рамы конструкции; оснащение колесной опорой, позволяющей перемещать установку по лаборатории; приводная система с плавным регулированием числа оборотов в заданном диапазоне; бункер

⁵ Детали машин и основы конструирования: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по агроинженерным специальностям / С. П. Казанцев, А. В. Карп, Е. И. Соболев [и др.] ; под ред. М. Н. Ерохина. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Издательство КолосС, 2011. – 512 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений/ Ассоц. "Агрообразование"). – ISBN 978-5-9532-0822-2. – EDN QNCZVH.

толщиной от 4 мм, изготовленный из нержавеющей стали, внутренняя и наружная поверхность которого должны иметь комплексное лакокрасочное покрытие, стойкое к агрессивным средам; возможность установки одновременно нескольких ножей, для испытания в одинаковых условиях; загружаемый субстрат должен быть приближен к реальным условиям; наличие датчиков контроля.

Общие технические характеристики разрабатываемой установки по ускоренным испытаниям режущих элементов машин для животноводства представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики разрабатываемой установки для ускоренных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов машин для животноводства

Наименование	Параметр / Значение
Электродвигатель АИР112МА8	Мощность $P_{\text{дв}} = 2,2$ кВт, частота вращения вала двигателя $n_{\text{дв}} = 750$ об/мин.
Клиноременная передача	ремень А—1400 IV ГОСТ 1284.1-89, число ремней, z шт. – 4, диаметр ведущего шкива, D_1 мм. – 80, диаметр ведомого шкива, D_2 мм. - 320.
Преобразователь частоты	Тип - ADV-M420, диапазон управления по частоте: от 0,1 до 400 Гц, кратность регулирования скорости: 1:50, точность регулирования скорости: $\pm 0,5\%$ максимальной скорости, время разгона/торможения: 0,1–3000 с.
Датчик температуры и влажности	Тип - Hydro-Mix НТ диапазон измерения влажности: 0-100%; частота измерений 25 раз в секунду; точность измерений 0,1%; рабочая температура процесса 0-120°C.

Мощность электродвигателя $P_{\text{дв}} = 2,2$ кВт, выбрана на основании анализа промышленных аналогов измельчителей кормов со сходными габаритами рабочей камеры (измельчитель травяных культур, универсальный измельчитель кормов, зернодробилка 9FP-20C)⁶.

Частота вращения вала установки должна обеспечивать форсирование режима испытаний, для этого конструкция установки оснащена преобразователем частоты Тип - ADV-M420. Наличие клиноременной передачи позволяет

⁶ Промышленные аналоги: 1. измельчитель травяных культур <https://aka-prom.com/product/izmelchitel-travyanyh-kultur-2-2kvt/>; 2. Универсальный измельчитель кормов <https://fermer.ru/product/universalnyy-izmelchitel-kormov>; 3. зернодробилка 9FP-20C <https://start-agro.ru/product/3/zernodrobilka-9fp-20c/>.

согласовывать частоту вращения от вала двигателя с валом установки, за счет передаточного числа.

Также, конструкция установки дополнительно оснащена датчиком температуры и влажности Hydro-Mix НТ, обеспечивающим измерение соответствующих параметров в процессе испытаний.

Ниже представлено теоретическое обоснование конструктивных параметров установки для ускоренных испытаний режущих элементов.

2.3. Обоснование конструктивных параметров установки для ускоренных испытаний режущих элементов

Обоснование количества испытуемых режущих элементов. Для обеспечения статистической достоверности результатов и возможности одновременного сравнения нескольких материалов и различных упрочняющих технологий, конструкция вала установки предусматривает три рабочие зоны: левая, центральная, правая (рис. 2.4).

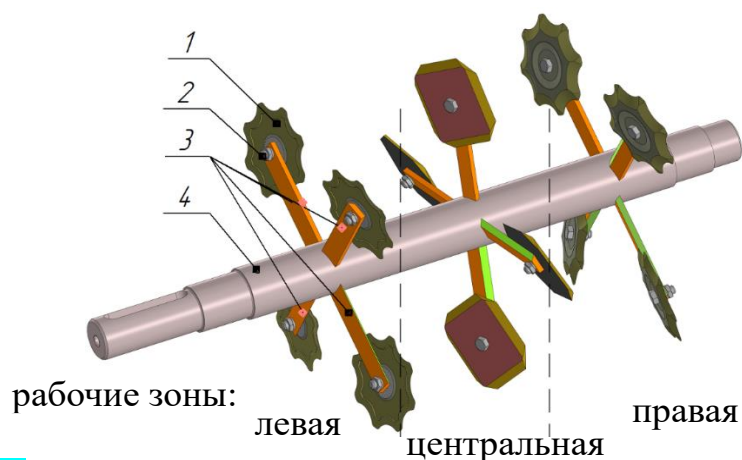


Рисунок 2.4 – Фиксация испытуемых режущих элементов в установке:

- 1 – испытуемые режущие элементы; 2 – болтовое соединение;
- 3 – держатель; 4 – вал

В каждой рабочей зоне устанавливается один базовый (эталонный) и три экспериментальных режущих элементов. Такая схема фиксации испытуемых режущих элементов обеспечивает трехкратную повторность для каждого варианта,

возможность сравнения всех образцов в идентичных условиях и исключает влияние случайных факторов на результат испытания.

Общее количество испытываемых образцов определено из условия:

$$n = m \cdot (k+1), \quad (2.8)$$

где m – число повторностей (минимальное количество образцов в группе для статистической достоверности); k – количество экспериментальных вариантов (различные материалы или упрочняющие технологии); 1 – эталонный образец.

Для обоснования выбора числа повторностей m рассмотрим три группы факторов: статистические требования, задачи эксперимента и конструктивные ограничения.

Статистические требования. Согласно общепринятым требованиям к планированию эксперимента [2, 22, 32, 128] минимальное количество параллельных опытов (повторностей) для обеспечения статистической достоверности результатов составляет $m = 3$. Это обусловлено следующим:

- при $m = 1$ - невозможно оценить разброс результатов и вычислить дисперсию, любое случайное отклонение может быть принято за закономерность;
- при $m = 2$ - можно оценить разброс, но доверительный интервал будет слишком широкий;
- при $m = 3$ - минимальное количество, позволяющее вычислить среднее арифметическое значение, оценить среднеквадратичное отклонение, построить доверительный интервал с использованием распределения Стьюдента;
- при $m \geq 4$ - точность повышается незначительно (уменьшение доверительного интервала пропорционально $1/\sqrt{m}$) но трудоемкость и стоимость испытаний растут линейно.

Задачи эксперимента. В рамках эксперимента необходимо сравнить базовый (эталонный) образец с несколькими экспериментальными вариантами, различающимися по марке, стали и методами упрочнения режущей кромки. Число повторностей $m = 3$, позволяет учесть сравнение с трехкратной повторностью в одинаковых условиях эксплуатации.

Конструктивные ограничения. Режущие элементы располагаются не только линейно вдоль вала, но и по окружности (в различных плоскостях), что позволяет разместить их в количестве 12 штук на валу с учетом ограничений длины вала ($L_{\text{в}} = 500$ мм).

Таким образом, с учетом схемы размещения испытуемых и базовых режущих элементов, общее количество устанавливаемых образцов составляет 12 шт. Это количество является оптимальным вариантом между статистической достоверностью (три повторности), количеством сравниваемых вариантов, и конструктивными возможностями установки (длина вала, диаметр ножей и необходимые зазоры). При этом все испытуемые режущие элементы вращаются с одинаковой угловой скоростью, контактируют с одним и тем же субстратом, расстояние от оси вращения до режущей кромки одинаково для всех испытуемых режущих элементов, температура и влажность среды одинакова во всем объеме бункера, следовательно различие в износе между образцами будут обусловлены только свойствами материала или упрочняющей технологии с учетом условий испытаний.

Обоснование угла крепления режущих элементов на держателях вала установки для ресурсных испытаний. При работе режущего элемента на вращающемся валу возникает полная сила резания $F_{\text{рез}}$ направленная по нормали к поверхности лезвия.

Держатели ножей установлены на валу под углом 90° к его оси, при этом, если устанавливать ножи под этим же углом, то в процессе работы будет отсутствовать радиальное воздействие на субстрат, следовательно субстрат будет смещаться в стороны относительно режущего элемента на его толщину образуя канавку (борозду) (рис. 2.5). Нож не будет резать материал, а будет скользить вдоль образованной канавки, из-за чего будет отсутствовать распределение субстрата в бункере установки.

Для эффективного моделирования процесса изнашивания и обеспечения равномерного распределения субстрата необходимо оптимальное соотношение

между составляющими этой силы. Для этого необходимо обосновать угол установки режущего элемента β (рис. 2.6), который определит равномерное распределение полной силы резания на две составляющие: осевую и радиальную.

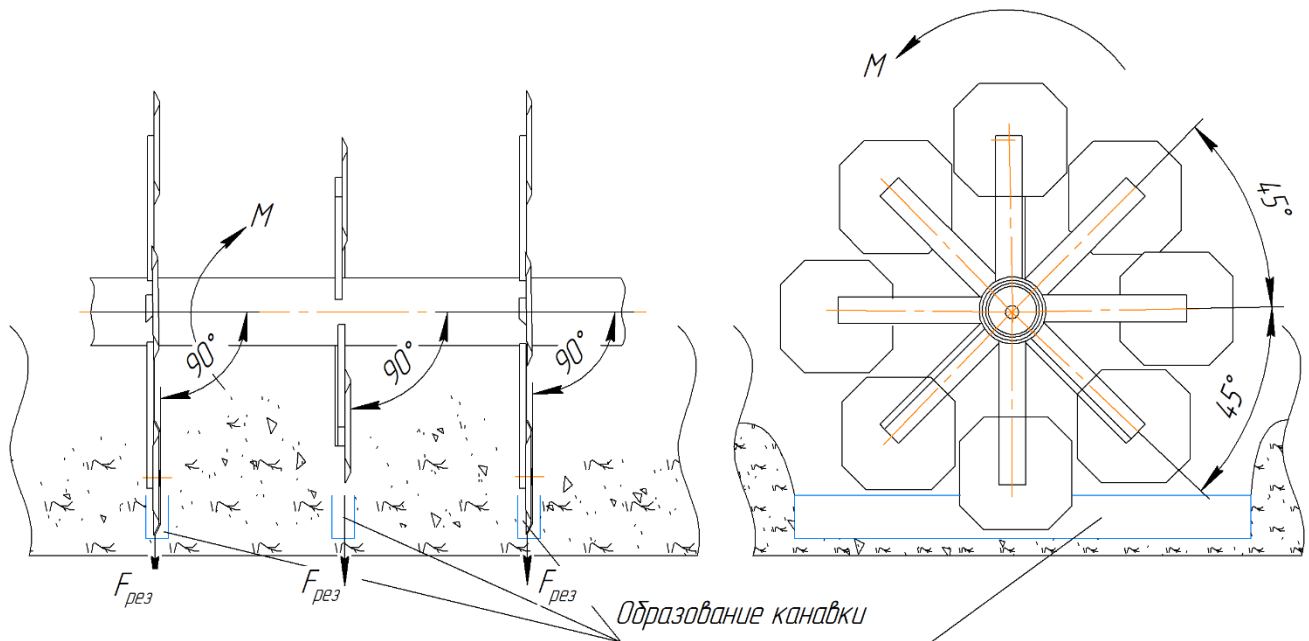


Рисунок 2.5 – Действующие силы, при расположении режущего элемента под углом 90° к валу установки

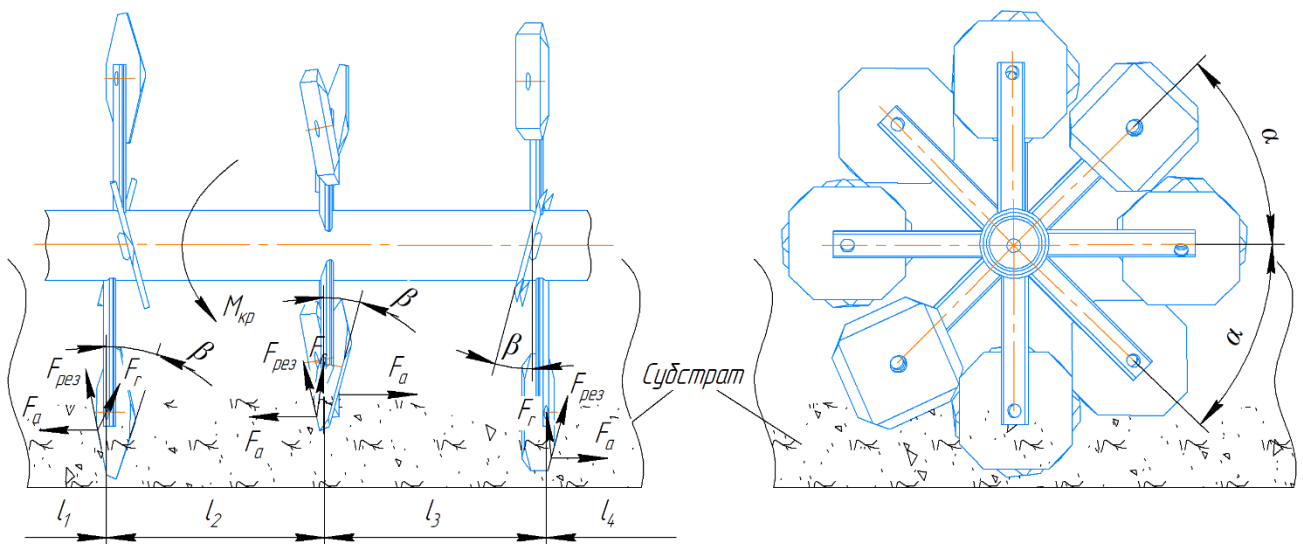


Рисунок 2.6 – Действующие силы, при расположении режущего элемента под углом β к держателю

Полная сила резания раскладывается на составляющие по правилу параллелограмма сил:

$$F_{\text{рез}} = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}, \quad (2.9)$$

где F_r – радиальная составляющая; F_a – осевая составляющая.

Силу резания $F_{\text{рез}}$ можно вычислить:

$$F_{\text{рез}} = \frac{2M_{\text{кр}}}{D \cdot z \cdot \eta}, \quad (2.10)$$

где $M_{\text{кр}}$ – крутящий момент на рабочем валу, Н·м; D – диаметр траектории режущего элемента, м; z – количество одновременно работающих режущих элементов; η – КПД привода.

Радиальная сила F_r определяется из соотношения:

$$F_r = F_{\text{рез}} \cdot \cos \beta, \quad (2.11)$$

где $F_{\text{рез}}$ – сила резания, Н; β – угол установки ножа на держателе.

Осевая сила F_a определяется из соотношения:

$$F_a = F_{\text{рез}} \cdot \sin \beta. \quad (2.12)$$

Суммарная радиальная сила всех (четырех) режущих элементов:

$$\sum F_r = 4 \cdot F_r. \quad (2.13)$$

Интенсивность циркуляции (сумма модулей осевых сил) в рабочей зоне, обеспечивающая активное перемещение:

$$\sum |F_a| = n \cdot F_{\text{рез}} \cdot \sin \beta, \quad (2.14)$$

где n – количество ножей в рабочей зоне (4).

Максимальное расстояние между соседними держателями, при котором сохраняется перемешивание субстрата:

$$L_{\text{между}}^{\text{max}} = 2 \cdot L_n (\sin \beta + k \cdot \cos \beta), \quad (2.15)$$

где L_n – длина ножа, мм; k – эмпирический коэффициент инерционности ($0,3 \leq k \leq 0,7$).

Для подтверждения работоспособности и надежности разрабатываемой установки необходимо выполнить прочностной анализ для наиболее нагруженного режима установки – процесса резания субстрата с максимальным сопротивлением, а также для аварийной ситуации – заклинивания режущих элементов.

Расчет проводится по максимальному напряжению в месте соединения держателя режущего элемента и вала установки (сварной шов) (рис. 2.7).

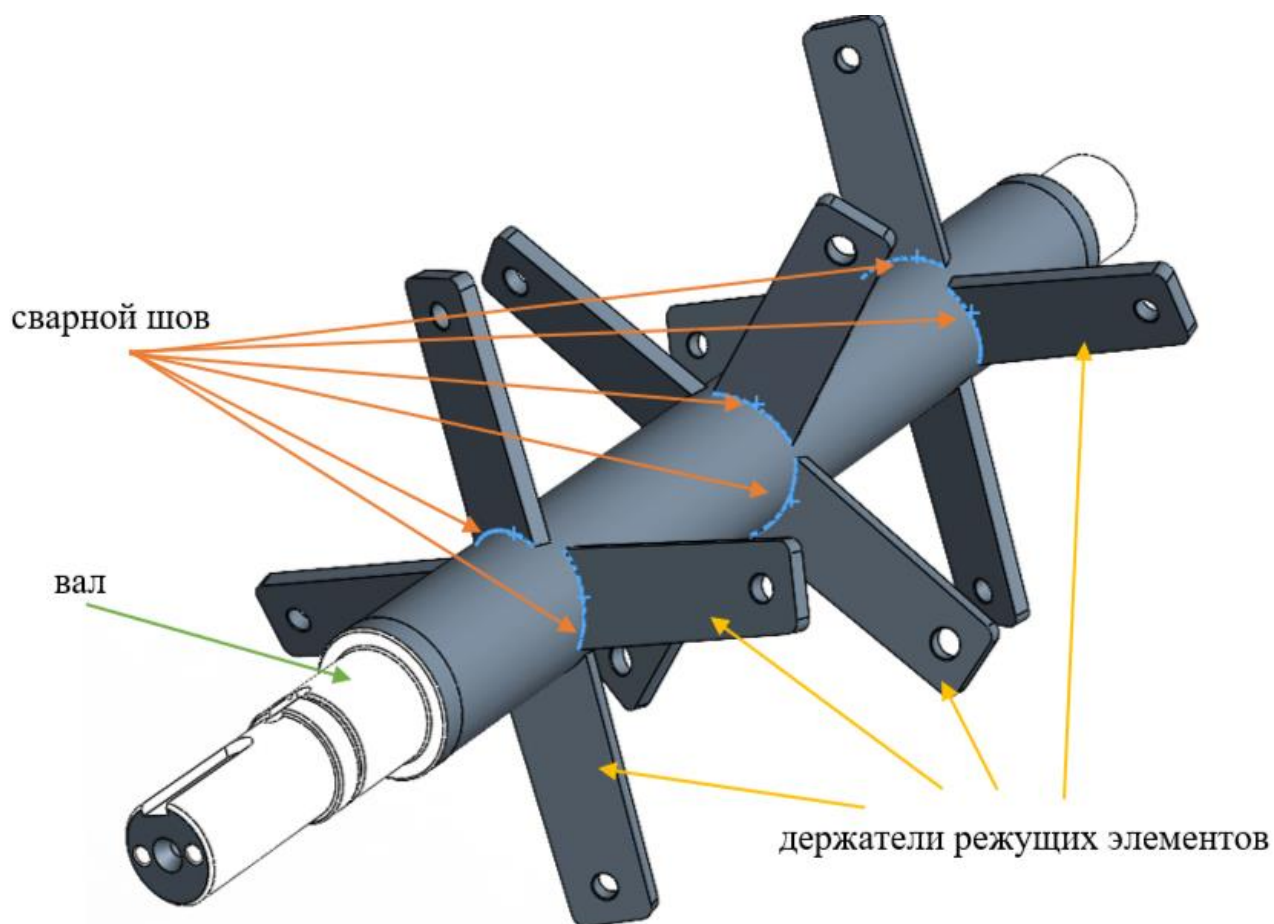


Рисунок 2.7 – 3D модель вала установки с указанием зон сварного шва

Максимальное напряжение должно быть меньше предела текучести материала [60]:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_T, \quad (2.16)$$

где σ_{max} – максимальное напряжение в сварном соединении, определяется методом конечных элементов в имитационной программе, МПа; σ_T – предел текучести материала, МПа.

Коэффициент запаса прочности сварного соединения [60]:

$$n_{CB} = \frac{R_{CB}}{\sigma_{max}} \geq [n_{CB}], \quad (2.17)$$

где R_{CB} – расчетное сопротивление угловых сварных швов, МПа;
 $[n_{CB}]$ – допускаемый запас прочности сварного соединения, $[n_{CB}] = 1,3–1,5$ для статических нагрузок.

Прочностной расчет вала установки позволяет оценить надежность и безопасность конструкции при эксплуатации в заданных режимах.

2.4. Теоретические исследования прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания⁷

Долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта [44].

Долговечность режущего элемента (ресурс) T_p определяется временем достижения предельного состояния, при котором нарушается его функциональная способность.

В общем виде ресурс режущих элементов можно представить как функцию нескольких групп параметров:

$$T_p = f(K, M, G, U), \quad (2.18)$$

где K – параметр кинематики; M – механические свойства материала; G – геометрические параметры режущей кромки; U – параметры внешней среды.

Перечисленные параметры составляют основные группы факторов, определяющих долговечность режущих элементов. Для визуализации структуры этих факторов на ресурс построена диаграмма Исикавы (причинно-следственная диаграмма), приведенная на рисунке 2.8.

⁷ Выполнено совместно с научным руководителем Скороходовым Д.М.

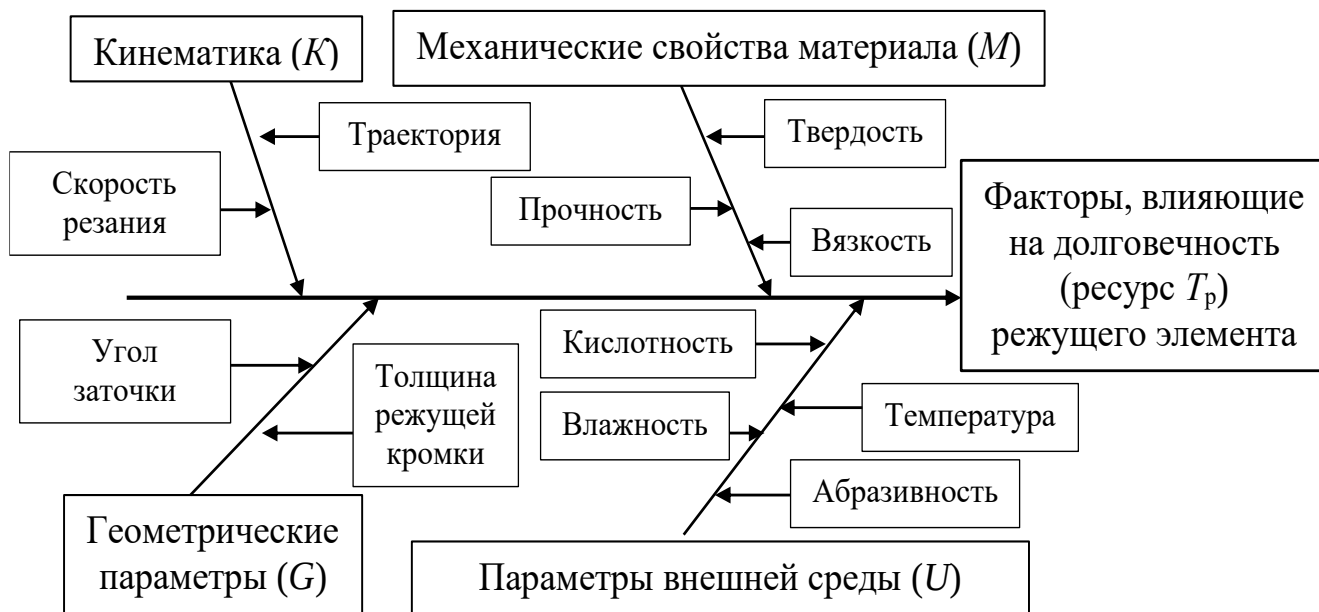


Рисунок 2.8 – Факторы, влияющие на долговечность режущего элемента

Кинематические факторы (K) отражают параметры движения ножа: с какой скоростью он режет корм и какова траектория его движения. Чем выше скорость резания, тем интенсивнее происходит изнашивание.

Механические свойства материала (M), такие как твёрдость, прочность и вязкость, определяют на сколько долго режущая кромка сохраняет свою остроту и способность сопротивляться абразивному воздействию кормовых частиц.

Геометрические параметры режущей кромки (G): угол заточки и толщина режущей кромки, определяют остроту резания, его способность к резанию и интенсивность затупления в процессе эксплуатации.

Параметры внешней среды (U), в которой работают режущие элементы (кислотность, влажность, абразивность, температура), ускоряют или замедляют процесс изнашивания изделия.

Таким образом, функциональная зависимость (ф. 2.18) показывает, что ресурс режущего элемента определяется совместным влиянием всех перечисленных факторов.

Учитывая, что абразивное и коррозионное изнашивание являются физически независимыми процессами, их вклад в суммарную интенсивность изнашивания можно суммировать:

$$I_{\Sigma} = I_{\text{абр}}(K, M, U) + I_{\text{кор}}(U, M), \quad (2.19)$$

где I_{Σ} – суммарная интенсивность изнашивания, объединяющую абразивную и коррозионную составляющую, г/ч; $I_{\text{абр}}$ – интенсивность абразивного изнашивания, зависящая от кинематических параметров (K), свойств материала (M) и абразивности среды (U); $I_{\text{кор}}$ – интенсивность коррозионного изнашивания, зависящая от параметров среды (U) и свойств материала (M).

Поскольку ресурс режущего элемента T_p определяется временем достижения предельного состояния, а предельное состояние характеризуется потерей массы $\Delta m_{\text{кр}}$ (критическая потеря массы), то ресурс может быть выражен как отношение критической потери массы к суммарной интенсивности изнашивания:

$$T_p = \frac{\Delta m_{\text{кр}}}{I_{\Sigma}}, \quad (2.20)$$

где $\Delta m_{\text{кр}}$ – критическая потеря массы (предельно допустимый массовый износ), г.

Данное выражение отражает фундаментальный принцип: чем выше скорость изнашивания, тем меньше ресурс и наоборот.

Согласно фундаментальному закону абразивного изнашивания, установленному Дж.Ф. Арчардом, объем изношенного материала прямо пропорционален нормальной нагрузке и пути трения и обратно пропорционален твердости материала [148, 149]:

$$V = \frac{K \cdot F \cdot L}{H}, \quad (2.21)$$

где V – объем изношенного материала, мм³; K – безразмерный коэффициент износа, характеризующий вероятность отделения частицы материала при единичном акте трения; F – общая нормальная нагрузка, Н; L – путь трения, м; H – твердость материала, МПа.

Теоретическую основу для понимания механизмов абразивного изнашивания, при циклических нагрузках, разработал И.В. Крагельский.

В его усталостной теории изнашивания предложены аналитические зависимости для расчета линейного износа при упругом и пластическом контакте.

Для условий пластического контакта, характерного для резания кормовых материалов, интенсивность изнашивания I_h может быть описана выражением [83, 84]:

$$I_h = \frac{\tau \cdot \delta}{t \cdot \sigma_s \cdot HB}, \quad (2.22)$$

где τ – удельная сила трения, МПа; δ – относительное удлинение; t – коэффициент усталости; σ_s – предел текучести, МПа; HB – твердость материала, МПа.

В лабораторных условиях измеряют в основном не объем, а массу исследуемого изделия, а для оценки долговечности режущих элементов необходима скорость резания.

Для перехода от объемного износа по закону Дж.Ф. Арчарда к интенсивности абразивного изнашивания по массе введены следующие параметры: давление в зоне контакта P и скорость резания v для учета пути трения за единицу времени, а также выполнено преобразование объема в массу через плотность материала. В результате получено выражение для базовой интенсивности абразивного изнашивания:

$$I_{абр} = k_1 \frac{P \cdot v}{H}, \quad (2.23)$$

где k_1 – безразмерный коэффициент износа; P – давление в зоне контакта, Па; v – скорость резания, м/с; H – твердость материала, МПа.

Однако в реальных условиях эксплуатации режущих элементов животноводческих машин на абразивный износ накладывается коррозионное воздействие органических кислот и влажности, которые ослабляют поверхностный слой и ускоряют микрорезание. Для учета этих факторов в модель введены корректирующие множители:

множитель φ^m – коррекция на ускорение износа под действием влажности, учитывающий нелинейное влияние влажности на интенсивность изнашивания. Степень m – определяется экспериментальным путем и зависит от материала режущего элемента и типа коррозионно-абразивной среды ($0,5 < m < 1,5$ для сталей работающих в коррозионно-активных средах) [73, 125, 144].

множитель $(1 + \alpha \sum C_i)$ – учитывает ускорение износа под действием органических кислот (линейная аппроксимация в диапазоне концентраций 0-3%). При $\sum C_i = 0$ (нейтральная среда) множитель равен 1. С ростом концентрации кислот интенсивность изнашивания увеличивается пропорционально коэффициенту α . Коэффициент α определяется экспериментально и показывает, насколько сильно кислоты ускоряют износ [125, 157].

С учетом корректирующих множителей интенсивность абразивного изнашивания имеет вид:

$$I_{\text{абр}} = k_1 \frac{P \cdot v}{H} \cdot (1 + \alpha \sum C_i) \cdot \varphi^m, \quad (2.24)$$

где α – коэффициент влияния кислотной среды; C_i – концентрация i -й органической кислоты (уксусной, масляной, молочной), %; φ – относительная влажность среды; m – показатель степени влияния влажности.

Согласно теории академика В.П. Горячкина, общее сопротивление резанию (тяговое усилие) для рабочих органов сельскохозяйственных машин определяется тремя составляющими: 1. Сопротивление трения рабочего органа о материал ($f \cdot G$); 2. Сопротивление деформированию и резанию (полезная работа) ($k \cdot a \cdot b$); 3. Инерционное сопротивление на отбрасывание частиц ($\varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2$). Классическая формула В.П. Горячкина (теория резания сельскохозяйственных материалов) [26, 63, 143]:

$$P_{\text{рез}} = f \cdot G + k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2, \quad (2.25)$$

где $P_{\text{рез}}$ – полное сопротивление резанию, Н; G – вес рабочего органа (сила тяжести), Н; f – коэффициент сопротивления протаскиванию (0,25-0,4); k – коэффициент удельного сопротивления резанию, Па; a – глубина резания

(толщина среза), м; b – ширина захвата, м; ε – коэффициент скоростного сопротивления; кг/м³; v – скорость резания (скорость движения), м/с.

Для условий резания кормовых материалов (сено, солома, силос) основная доля энергии затрачивается на вторую составляющую – деформирование и резание. Для упрощения расчетов давление резания определяется как:

$$P = \frac{P_{\text{рез}}}{S_{\text{конт}}} = \frac{k \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot v^2}{a \cdot b} = k + \varepsilon \cdot v^2, \quad (2.26)$$

где $S_{\text{конт}} = a \cdot b$ – площадь контакта.

В работах Н.Е. Резника (продолжателя школы В.П. Горячкина) установлена зависимость силы резания от остроты лезвия [73, 104, 105]:

$$P_{\text{рез}} = \delta \cdot \Delta s \cdot \sigma_p, \quad (2.27)$$

где δ – толщина (острота) лезвия; Δs – длина активной части лезвия, σ_p – нормальные разрушающие напряжения материала.

Таким образом, давление резания может быть определено с учетом остроты лезвия:

$$P = \frac{P_{\text{рез}}}{S_{\text{конт}}} = \frac{\delta \cdot \Delta s \cdot \sigma_p}{a \cdot b}. \quad (2.28)$$

Скорость электрохимической коррозии металла в кислой среде подчиняется уравнению Аррениуса⁸, устанавливающему экспоненциальную зависимость контактов скорости реакции от температуры [150, 155]:

$$k = k_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2.29)$$

где k_2 – предэкспоненциальный множитель, характеризующий частоту столкновения молекул реагентов с поверхностью металла и вероятность их правильной ориентации [155]; E_a – энергия активации процесса коррозии, кДж/моль; $R = 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура среды, К.

⁸ Arrhenius S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1889. Vol. 4U. No. 1. pp. 226-248. <https://colab.ws/articles/10.1515/zpch-1889-0416>

Согласно исследованиям [150, 151], кислотность и температура являются основными факторами, определяющими скорость коррозии углеродистых сталей в растворах органических кислот, причем реакционная кинетика подчиняется уравнению Аррениуса. Для углеродистых сталей в органических кислотах энергия активации коррозии составляет $E_a = 38,8 \dots 53,6$ кДж/моль, а в более агрессивных средах может достигать 70 кДж/моль [150, 160].

Интенсивность коррозионного изнашивания $I_{\text{кор}}$ принимается пропорциональной константе скорости коррозии:

$$I_{\text{кор}} = k_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2.30)$$

где k_2 – предэкспоненциальный множитель (г/мин), объединяющий концентрацию агрессивных ионов, площадь поверхности и свойства материала.

Поскольку абразивный и коррозионный процессы протекают одновременно и независимо, суммарная интенсивность изнашивания равна их сумме:

$$I_{\Sigma} = I_{\text{абр}} + I_{\text{кор}} = k_1 \frac{P \cdot v}{H} \cdot (1 + \alpha \sum C_i) \cdot \varphi^m + k_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (2.31)$$

Совместное действие коррозионно-механического изнашивания дает больший износ режущим элементам, чем простая сумма отдельных процессов. Коррозия ослабляет поверхностный слой, а абразив удаляет защитные оксидные пленки, обнажая свежий металл для дальнейшей коррозии.

Для описания процесса затупления режущей кромки во времени используется модель, предложенная М.М. Северным [73]:

$$2\rho(t) = 2\rho_0 \cdot k \cdot t^p, \quad (2.32)$$

где $2\rho(t)$ – текущая толщина режущей кромки, мм; $2\rho_0$ – начальная толщина режущей кромки, мм; k – коэффициент интенсивности затупления; t – наработка (часы или циклы); p – показатель степени, характеризующий кинетику изнашивания (скорость замедления износа).

Данная модель описывает кинетику изнашивания режущих элементов сельскохозяйственных машин, учитывая замедление скорости износа после

начального периода приработки, что в свою очередь позволяет прогнозировать ресурс режущего элемента по геометрическому параметру износа.

Для перерасчетов результатов стендовых ускоренных испытаний в прогнозируемый эксплуатационный ресурс используем коэффициент ускорения K_y , регламентируемый ГОСТ 23.205-79 [30].

Согласно теории подобия и форсированных испытаний, коэффициент ускорения определяется как:

$$K_y = \frac{I_{\text{стенд}}}{I_{\text{эксп}}} = \frac{T_{\text{эксп}}}{T_{\text{стенд}}}, \quad (2.33)$$

где $I_{\text{стенд}}$ – интенсивность изнашивания в стендовых условиях, г/ч;
 $I_{\text{эксп}}$ – интенсивность изнашивания в эксплуатационных условиях, г/ч;
 $T_{\text{эксп}}$ – ресурс в реальных условиях эксплуатации, ч; $T_{\text{стенд}}$ – ресурс, полученный при стендовых испытаниях, ч.

По ГОСТ 23.205-79, ускоренные ресурсные испытания проводятся методом ступенчатого чередования нормального и форсированного режимов. Форсированный режим выбирается таким образом, чтобы скорость изнашивания на нормальной ступени зависела только от накопленного износа, а не от того, как износ был получен и не должны происходить изменения относительно распределения износа между элементами конструкции. Это гарантирует, что механизм изнашивания в ускоренном режиме остается таким же, как в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, на основе анализа фундаментальных положений теории абразивного изнашивания (И.В. Крагельский, Дж. Ф. Арчард), кинетики коррозионных процессов (уравнения Аррениуса), теории резания сельскохозяйственных материалов (В.П. Горячкин) и методологии ускоренных ресурсных испытаний (ГОСТ 23.205-79) получена математическая модель для прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания:

$$T_p = \frac{\Delta m_{кр}}{k_1 \cdot \frac{P \cdot \vartheta}{H} \cdot (1 + \alpha \cdot \sum_{i=1}^3 C_i) \cdot \varphi^m + k_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \cdot K_y, \quad (2.34)$$

где T_p – прогнозируемый ресурс режущего элемента, ч; $\Delta m_{кр}$ – критическая потеря массы, г; k_1 – коэффициент абразивного изнашивания; P – давление резания, Па; ϑ – скорость резания, м/с; H – твердость материала, НВ; α – коэффициент влияния кислотной среды; C_i – концентрация i -й кислоты (молочной, уксусной, масляной), %; φ – влажность среды, отн. ед.; m – показатель степени влияния влажности; k_2 – предэкспоненциальный множитель коррозионного процесса; E_a – энергия активации коррозии, кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура среды, К; K_y – коэффициент ускорения.

В упрощенном виде данную модель можно представить следующим образом:

$$T_p = \frac{\Delta m_{кр}}{I_\Sigma} \cdot K_y. \quad (2.35)$$

Сначала рассчитывается стендовый ресурс $T_{стенд} = \frac{\Delta m_{кр}}{I_\Sigma}$ в форсированных условиях, а затем с помощью коэффициента ускорения K_y выполняется перерасчет в прогнозируемый эксплуатационный ресурс:

$$T_{эксп} = K_y \cdot T_{стенд}. \quad (2.36)$$

Это позволяет по результатам ускоренных стендовых испытаний прогнозировать ресурс режущих элементов в реальных условиях эксплуатации.

2.5. Обоснование критериев предельного состояния режущих элементов

Согласно ГОСТ Р 27.102-2021, под предельным состоянием понимается состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [44].

Для режущих элементов это состояние наступает, когда параметры изнашивания достигают критических значений, при которых дальнейшее использование ножа становится экономически не выгодным или технически невозможным.

На основе анализа литературных данных [34, 44, 73, 107, 108, 109], результатов предварительных экспериментов и требований к качеству кормоприготовления [28, 45], а также в соответствии с ГОСТ 30479-79 [34], установлены пять основных критериев предельного состояния режущих элементов машин для животноводства: 1. По толщине режущей кромки; 2. По углу заточки; 3. Износ по нормали; 4. По коррозионному поражению поверхности; 5. По потере массы.

Критерий предельного состояния по толщине режущей кромки. В процессе эксплуатации режущей кромки происходит ее затупление, характеризующееся увеличением толщины лезвия. Различают три стадии износа⁹: приработка, установившийся износ, катастрофический износ. На стадии катастрофического износа резко возрастает усилие резания и ухудшается качество обработки.

Согласно зоотехническим требованиям¹⁰ крупность частиц корма для крупного рогатого скота должна быть не более 3 мм. При затуплении режущей кромки режущего элемента свыше 0,5 мм, крупность частиц превысит норму.

При затуплении лезвия до 0,5 мм усилие резания возрастает в 1,5-2,0 раза по сравнению с острым лезвием. Качество измельчения кормов (крупность частиц, однородность) при толщине режущей кромки более 0,5 мм перестает соответствовать зоотехническим требованиям. Дальнейшее увеличение толщины режущей кромки (> 0,6 мм) приводит к тому, что нож начинает не резать, а рвать волокнистую структуру корма, что снижает его поедаемость животным.

В связи с этим в качестве предельного состояния по толщине режущей кромки режущих элементов принято значение $2\rho_{кр} = 0,5$ мм.

Критерий предельного состояния по углу заточки. Угол заточки β определяет его остроту лезвия и способность к резанию. В процессе эксплуатации режущего элемента угол заточки увеличивается, что приводит к росту усилия резания и ухудшению качества резания материала.

⁹ Источник: <https://bibl.ru/4/6.htm>

¹⁰ Источник: <https://studfile.net/preview/10696387/page:8/>

В исследовании Аюгина Н.П., Яковлева С.А., Кузина А.С., Калашникова И.А., в работе [8], проведены испытания ножей измельчителей кормов из сталей У7, с углами заточки 10, 20 и 30° в условиях абразивного изнашивания. Результаты показали, что наименьший износ, измеренный по ширине ножа (износ по нормали), характерен для ножей, имеющих угол заточки 30°, а наибольший – для ножей с углом заточки 10°. При этом в работах [1, 8] рекомендуется устанавливать ножи под углом 30°, при котором «рубящее» резание меняется на резание «с перемещением» или «со скольжением».

Качество получаемой кормовой смеси оценивается коэффициентом вариации, допустимое значение которого для КРС составляет $V < 12...16\%$ ¹¹. Износ режущих элементов, в частности увеличение угла заточки β до 30°, приводит к ухудшению процесса резания и как следствие, к снижению однородности смешивания, увеличению коэффициента вариации выше допустимого.

Таким образом, значение $\beta_{кр} = 30^\circ$ является критическим с точки зрения резкого роста усилия резания и потери режущей способности.

Критерий предельного состояния по износу по нормали. Износ по нормали характеризует линейное смещение режущей кромки относительно исходного положения и является интегральным показателем, учитывающим как затупление, так и изменение геометрии лезвия.

В металлообработке установлен критерий допустимого износа резцов по задней грани $h = 2...3$ мм для черновой обработки, после чего инструмент подлежит переточке⁴. Для режущих элементов сельскохозяйственных машин, работающих в аналогичных условиях абразивного изнашивания предельное состояние по износу по нормали обусловлено следующими факторами: при износе по нормали более 2 мм нарушается геометрия режущей кромки, что приводит к дисбалансу; согласно исследованиям [76, 89, 91, 147] при достижении износа резца по задней грани $h = 2$ мм наступает стадия катастрофического износа, характеризующаяся резким возрастанием сил трения, температуры в зоне контакта и последующим

¹¹ Источник: <https://vikiidalka.ru/2-200910.html>

разрушением инструмента; ножи смесителей-кормораздатчиков выбраковываются при смещении режущей кромки на 2-3 мм.

В связи с этим, для дальнейших исследований аналогичный критерий принят для предельного износа режущих элементов по нормали $\Delta C_{кр} = 2,0$ мм.

Критерий по коррозионному поражению поверхности. Коррозионное поражение характеризует площадь поверхности режущего элемента, пораженную коррозией, в процентах от общей площади. Развитие коррозии снижает прочностные характеристики материала и ускоряет абразивный износ.

ГОСТ 9.908-85 [39] устанавливает методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости металлов и сплавов при различных видах коррозии, включая коррозию пятнами $G_{кр}$. Согласно данному стандарту, допустимые показатели коррозионной стойкости устанавливаются в нормативно-технической документации на изделие.

При степени коррозионного поражения поверхности режущих элементов более 15% происходит заметное снижение усталостной прочности материала. Это подтверждается исследованиями, показывающими, что при коррозии пятнами наступает пороговый уровень, после которого скорость снижения механических свойств материала резко возрастает. Коррозионные пятна $G_{кр} > 15\%$ начинают сливаться, образуя язвы и очаги питтинговой коррозии, что приводит к концентрации напряжений и риску разрушения. Питтинговая коррозия является одной из наиболее опасных форм локального разрушения, так как приводит к образованию глубоких каверн при относительно небольшой общей потере массы. Это создает очаги концентрации напряжений, которые при динамических нагрузках, характерные для работы смесителей-кормораздатчиков, могут привести к внезапному разрушению режущего элемента.

Согласно классификации Американского общества инженеров-строителей (ASCE), степень потери толщины металла до 15% классифицируется как

минимальное повреждение¹². Превышение этого порога переводит повреждение в категорию «умеренное» или выше, что требует немедленного вмешательства.

На основе вышесказанного, установлен критерий по коррозионному поражению поверхности режущих элементов машин для животноводства $G_{кр} = 15 \%$ от общей площади ножа.

Критерий предельного состояния по потере массы. Потеря массы является интегральным показателем, отражающим суммарный эффект абразивного и коррозионного изнашивания. Критическая потеря массы $\Delta m_{кр}$ определяется как доля от исходной массы образца.

При потере массы на 10% происходит пропорциональное уменьшение площади поперечного сечения режущего элемента. Согласно законам сопротивления материалов это приводит к росту действующих напряжений в опасных сечениях на 10-12%, что снижает ударную вязкость и сопротивление хрупкому разрушению [33, 74, 132]. Дальнейшая эксплуатация ножа с таким износом увеличивает риск его излома при случайных перегрузках (например, при попадании в бункер камня). Значение 10% является общепринятым в практике ресурсных испытаний рабочих органов сельскохозяйственных машин [73]. Оно используется при оценке долговечности режущих косилок, измельчителей, плужных лемехов и других деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания.

Таким образом, в дальнейших исследованиях критерием предельного состояния по потере массы принято $\Delta m_{кр} = 10\%$. Обобщая изложенные выше критерии предельного состояния режущих элементов машин для животноводства, приведем общую их систематизацию (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Критерии предельного состояния режущих элементов

Критерий	Обозначение	Предельное значение
Толщина режущей кромки	$2\rho_{кр}$	0,5 мм.
Угол заточки	$\beta_{кр}$	30°
Износ по нормали	$\Delta C_{кр}$	2,0 мм.
Коррозионное поражение	$G_{кр}$	15 %
Потеря массы	$\Delta m_{кр}$	10%

¹² Источник: <https://hinarratives.com/damage-ratings-for-steel-elements/>

Ресурс режущего элемента T_p определяется по первому достигнутому из установленных критериев предельного состояния:

$$T_p = \min(T_{2\rho_{кр}}, T_{\beta_{кр}}, T_{\Delta C_{кр}}, T_{G_{кр}}, T_{\Delta m_{кр}}), \quad (2.37)$$

где $T_{2\rho_{кр}}, T_{\beta_{кр}}, T_{\Delta C_{кр}}, T_{G_{кр}}, T_{\Delta m_{кр}}$ – наработка до достижения предельных значений по каждому из критериев.

Таким образом, установленные критерии предельного состояния режущих элементов машин для животноводства и принцип определения ресурса по первому достигнутому критерию позволяют объективно фиксировать момент наступления предельного состояния режущего элемента и создают основу для прогнозирования его долговечности.

2.6. Интегральный критерий выбора материалов и упрочняющих технологий

Выбор оптимального материала и упрочняющих технологий для изготовления режущих элементов машин для животноводства представляет собой многокритериальную задачу. С одной стороны необходимо обеспечить износостойкость и долговечность режущих элементов, с другой – минимизировать затраты на изготовление, упрочнение и эксплуатацию.

Для решения подобных задач, согласно научным исследованиям [84, 106], эффективно использовать интегральный критерий качества Q , основанный на принципе оптимизации «полезный эффект – затраты»:

$$Q = \frac{\text{полезный эффект}}{\text{затраты}} \rightarrow \max. \quad (2.38)$$

Полезный эффект для режущего элемента определяется его прогнозируемым ресурсом T_p (долговечностью, ч) и техническими характеристиками, влияющими на работоспособность. К числу таких характеристик относятся: твердость рабочей поверхности; коэффициент эффективности упрочнения $\eta_{упр}$ (отношение ресурса упрочненного образца (сталь 9XC+CrN) к ресурсу неупрочненного,

показывающий, во сколько раз упрочнение повышает долговечность; плотность материала ρ (характеризует материалоемкость, влияет на массу элемента).

Затраты включают в себя: стоимость изготовления и упрочнения C (руб.) (прямые затраты на материал, обработку и нанесения покрытия); эксплуатационные расходы (затраты на замену и обслуживание).

С учетом параметров, определяемых в разработанной математической модели прогнозирования долговечности режущих элементов, интегральный критерий качества может быть представлен следующим образом:

$$Q = \frac{T_p \cdot C_{\text{эт}}}{T_{\text{эт}} \cdot C} \rightarrow \max, \quad (2.39)$$

где T_p – ресурс экспериментального образца, ч; $T_{\text{эт}}$ – ресурс эталонного (базового) образца), ч.; $C_{\text{эт}}$ – стоимость эталонного образца, руб.; C – стоимость экспериментального образца, руб.

Таким образом, если $Q > 1$, это означает, что экспериментальный образец, эффективнее эталонного с учетом как ресурса, так и стоимости. Следовательно, если $Q < 1$ – менее эффективный.

2.7. Выводы по второй главе

На основе проведенных аналитических теоретических исследований, представленных во второй главе диссертации, сформулированы основные выводы:

1. Обоснован состав имитирующего субстрата для ускоренных ресурсных испытаний режущих элементов, обеспечивающий коррозионно-механический характер изнашивания, включающий: древесные опилки (фракция 3-5 мм) – 25-40% объема (связующий элемент и имитатор волокнистой структуры); кварцевый песок (фракция 0,1-0,25 мм) – 10% объема (абразив); органические кислоты (молочная 0,5-1%, уксусная 1-3%, масляная 0,1-0,5% от объема воды) – коррозионный фактор, влажность 50-90%, pH 4,0-5,5. Совместное воздействие факторов обеспечивает коэффициент ускорения $K_u = 3-5$ и сокращает время

испытаний в 3-5 раз. Диапазоны параметров обоснованы анализом реальных кормовых сред и требований к форсированию испытаний.

2. Разработана модель технического оснащения установки для ускоренных испытаний режущих элементов машин для животноводства.

3. Обоснованы конструктивные параметры установки: количество режущих элементов – 12 (4 группы х 3 образца), из условия статистической достоверности; угол установки ножей β – из условия оптимального соотношения осевой и радиальной составляющей силы резания; обосновано перекрытие зон влияния ножей (расстояние между держателями установки); прочностной анализ для наиболее нагруженного режима установки.

4. Получена математическая модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания, объединяющая теории механического изнашивания, коррозионной кинетики, резания сельскохозяйственных материалов и методологию ускоренных испытаний. Модель позволяет прогнозировать ресурс режущих элементов с учетом совместного влияния абразивного и коррозионного факторов.

5. Установлены критерии предельного состояния: толщина режущей кромки $2\rho_{кр} = 0,5$ мм; угол заточки $\beta_{кр} = 30^\circ$; износ по нормали $\Delta G_{кр} = 2$ мм; коррозионное поражение $G_{кр} = 15\%$; потеря массы $\Delta m - 10\%$ от исходной. Ресурс определяется по первому достигнутому критерию, что соответствует принципам теории надежности.

6. Предложен интегральный критерий выбора материалов и упрочняющих технологий $Q = \frac{T_p \cdot C_{эт}}{T_{эт} \cdot C} \rightarrow \max$, позволяющий сравнивать различные варианты по комплексному показателю «полезный эффект – затраты». Значение $Q > 1$ означает, что экспериментальный образец, эффективнее эталонного с учетом как ресурса, так и стоимости.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

3.1. Методика исследования

На основании проведенных аналитических исследований, действующих нормативных документов и условий эксплуатации режущих элементов машин для животноводства разработана блок-схема методики исследования, представленная на рисунке 3.1 [116, 120].

Сущность методики заключается в ускоренных ресурсных испытаниях режущих элементов машин для животноводства в субстрате, имитирующем коррозионно-механическое воздействие кормовых компонентов, с последующей оценкой износа по массе, геометрии лезвия и коррозионным поражениям [68].

Представленная блок-схема методики отражает структуру и последовательность основных ее этапов. Методика включает два этапа: этап 1 – ускоренные ресурсные испытания, проводимые на разработанной установке; этап 2 – эксплуатационные испытания, проводимые в производственных условиях на смесителях-кормораздатчиках [68].

Для проведения исследований задаются эталонным (базовым) образцом и экспериментальными образцами. Эталонным образцом выступает оригинальный нож смесителей-кормораздатчиков. Базовыми считают образцы, изготовленные из выбранного отечественного материала без упрочнения. Экспериментальные образцы изготавливают из того же материала, что и базовые, но с применением различных технологий упрочнения режущей кромки.

На этапе подготовки к испытаниям проводят визуальный контроль качества режущих элементов, а исходные значения контролируемых параметров фиксируют в протоколе. В перечень контролируемых параметров включены: геометрические (толщина режущей кромки, начальные диаметры угол заточки), гравиметрические (масса режущих элементов), коррозионные поражения (площадь поверхности, пораженная коррозией).

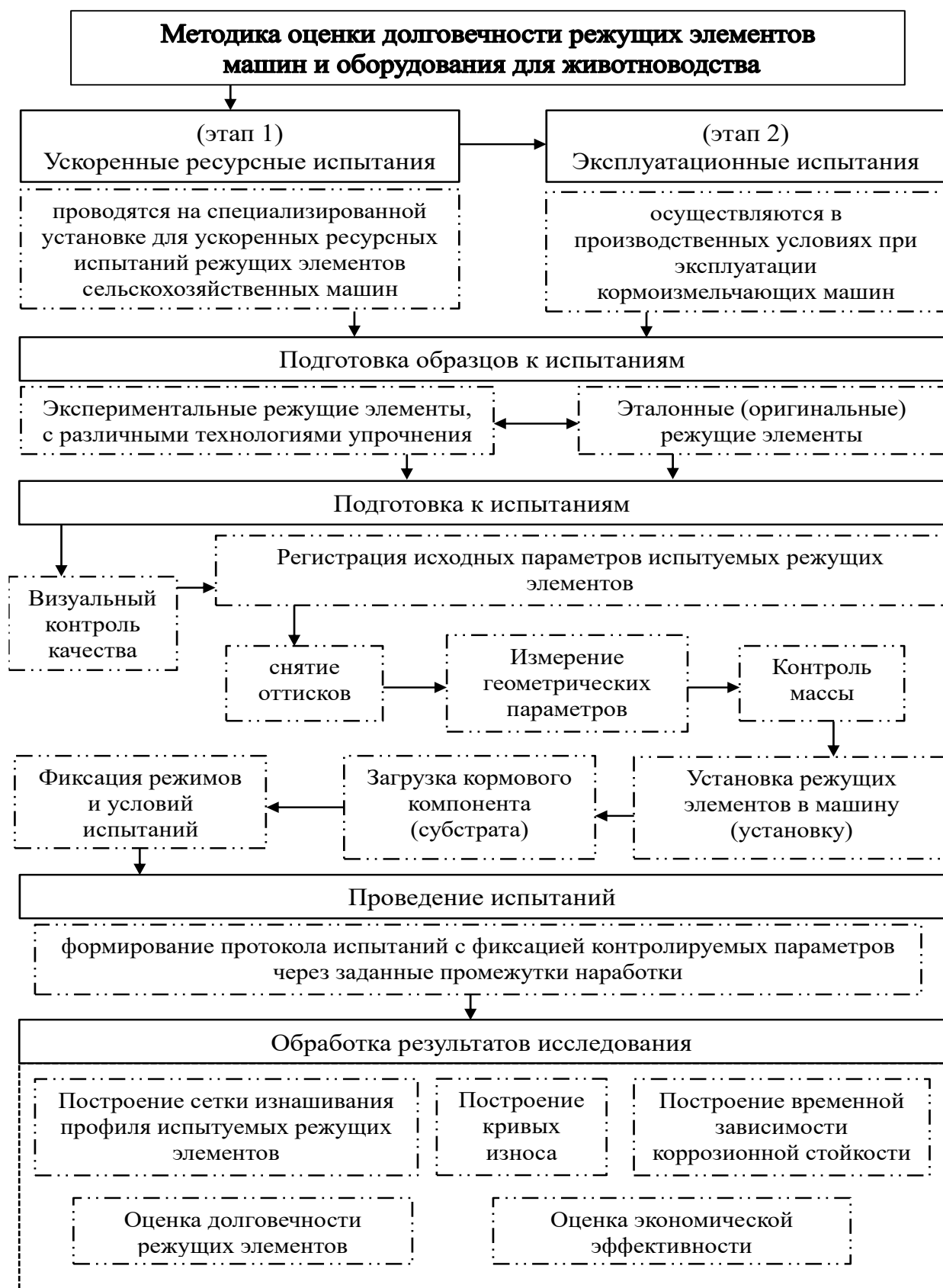


Рисунок 3.1 - Блок-схема методики оценки долговечности режущих элементов машин для животноводства

Далее, режущие элементы устанавливаются в установку для ускоренных испытаний (или в смеситель-кормораздатчик, в зависимости от этапа испытаний). Загружают субстрат и в протокол фиксируют условия испытаний. Проводятся испытания по установленному циклу и наработкой. По завершению испытаний полученные экспериментальные данные обрабатываются и выполняется оценка долговечности режущих элементов.

Ниже представлены объект и предмет исследования, основные элементы методики и установленные режимы проведения испытаний, а также оборудование, которое применялось в диссертационном исследовании.

3.2. Объект и предмет исследования

Объектом исследования является процесс коррозионно-механического изнашивания режущих элементов машин для животноводства в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Предметом исследования являются режущие элементы горизонтальных смесителей-кормораздатчиков, их взаимосвязь с эксплуатационными факторами и методами упрочнения.

Для подтверждения действия разработанной методики проводились сравнительные испытания между упрочненным и неупрочненным режущим элементом.

За эталонный образец (базовый) принят режущий элемент горизонтальных смесителей-кормораздатчиков, изготовленный из стали 9ХС, экспериментальными образцами являлись режущие элементы, изготовленные из той же стали, но с поверхностным упрочнением (CrN) (рис. 3.2).

Упрочнение экспериментальных режущих элементов проводилось CVD-методом металлоорганических соединений.



Рисунок 3.2 – Экспериментальные образцы: а – сталь 9ХС; б – сталь 9ХС с покрытием поверхностным упрочнением (CrN)

3.3. Оборудование, субстрат и режимы испытаний

3.3.1. Установка для ресурсных испытаний режущих элементов

На основе патентного анализа, анализа современных методов и средств испытания деталей сельскохозяйственных машин на коррозионно-механическое изнашивание, а также основываясь на принципиальную схему (рис. 2.3), и обоснованные конструктивные параметры (рис. 2.4., рис. 2.6), разработана установка для ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Установка для ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства

На конструкцию установки, с учетом методики проведения экспериментов, получен патент на изобретение¹³ (RU 2842437 C1, приложение А) [97].

¹³ Разработано совместно с научным руководителем Скороходовым Д.М.

Управление установкой осуществляется через модуль управления (рис. 3.4).

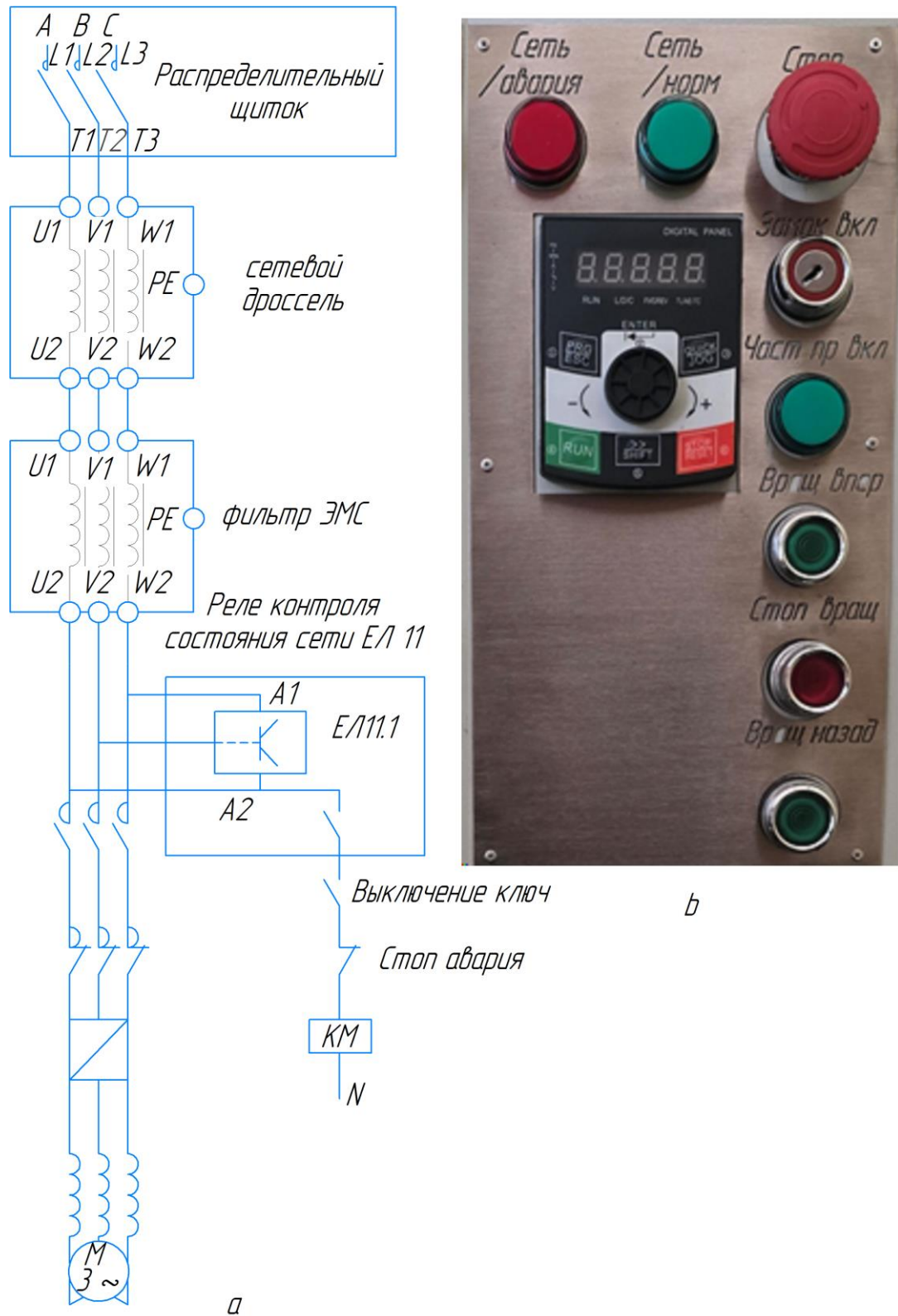


Рисунок 3.4 – Модуль управления установкой:
а – электрическая схема; б – пульт управления

Модуль управления установкой обеспечивает включение, регулировку частоты вращения испытуемых режущих элементов, изменение направления вращения (прямое и обратное) вала стендовой установки и выключение. Он оснащен кнопкой «СТОП» для экстренного торможения и кнопкой «СТОП ВРАЩЕНИЕ» обеспечивающей плавную остановку вращения вала установки.

Разработанная установка по сравнению с существующими имеет следующие преимущества:

1. Комплексное моделирование износа (воспроизведение коррозионно-механического изнашивания). Это достигается за счет использования специального субстрата, имитирующего химический состав и влажность кормовых сред, что является важным при испытаниях на износ режущих элементов для животноводства;

2. Одновременные сравнительные испытания. Конструкция установки позволяет испытывать до 12 режущих элементов. Это позволяет напрямую сравнивать износостойкость различных материалов и упрочняющих покрытий в строго идентичных условиях.

3. Регулировка параметров испытаний. Установка оснащена частотным преобразователем, который позволяет плавно изменять частоту вращения вала установки, тем самым меняя скорость резания. Также имеется возможность контроля влажности и температуры среды, что важно для точного воспроизведения режимов эксплуатации.

4. Модульность и адаптивность. Установка может быть адаптирована не только под режущие элементы машин для животноводства, но и других типов режущих элементов (например, кутерных ножей). Для этого корректируется состав имитирующего субстрата и методология эксперимента.

3.3.2. Субстрат и режимы испытаний

Испытания проводились циклически: 14 циклов по 4 часа каждый с промежуточными измерениями контролируемых параметров.

Режимы испытаний: частота вращения – 300 мин⁻¹, общая наработка 56 ч.

Состав субстрата включает в себя:

- древесные опилки фракцией 3-5 мм (30 % объема бункера);
- кварцевый песок фракцией 0,1-0,25 мм (10 % объема бункера);
- органические кислоты (молочная 0,8 %, уксусная 2 %, масляная 0,3 % от объема воды);
- вода – 3 л.

Контроль температуры и влажности осуществляли встроенным в установку датчиком Hydro-Mix HT (рис. 3.5), при этом влажность поддерживали на уровне $70 \pm 5\%$, температура испытаний составляла $20-25^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 3.5 – Датчик влажности и температуры Hydro-Mix HT

Кислотность среды определяли рН-метром (гигрометром FY-12, рис. 3.6), рН поддерживали на уровне $4,5 \pm 0,2$.



Рисунок 3.6 – Гигрометр FY-12 с выносным датчиком

3.4. Методика расчета прочностного анализа

Прочностной анализ установки выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) – численным методом, основанным на разбиение исследуемой конструкции на множество малых элементов (конечных элементов), для которых решаются уравнения механики деформируемого твердого тела.

Сущность метода заключается в следующем: исследуемая геометрическая модель разбивается на конечные элементы (тетраэдры, гексаэдры); для каждого элемента записываются уравнения равновесия; формируется глобальная система уравнений для всей модели; решается система с учетом граничных условий и приложенных нагрузок; вычисляются напряжения, деформации и перемещения в узлах модели.

Для расчета использовался метод конечных элементов в перемещениях, при котором неизвестные являются перемещения узлов конечно-элементной сетки.

Напряжения и деформации определялись через перемещения с использованием физических и геометрических соотношений.

Расчет выполнялся в программе SolidWorks Simulation, позволяющей проводить инженерные расчёты прочности, устойчивости и деформативности конструкций методом.

Для расчёта создана трехмерная модель вала с приваренными держателями режущих элементов (рис. 2.7). Основные геометрические параметры модели: диаметр вала – 40 мм; длина вала – 500 мм; количество держателей – 12 (3 зоны по 4 держателя); толщина держателя 8 мм, ширина держателя у основания вала – 38 мм, возле ножа – 34 мм; длина 105 мм; тип сварного шва – угловой, по периметру соединения.

Для проведения прочностного анализа сварного соединения держателя режущих элементов с валом установки заданы физико-механические характеристики материалов, соответствующие выбранным маркам, стали (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Механические характеристики материалов [27, 35, 42]

Элемент конструкции установки	Материал	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Предел текучести, σ_t / расчетное сопротивление $R_{св}$, МПа
Вал	Сталь 20 (ГОСТ 1050-2013)	$2,0 \cdot 10^5$	0,30	245
Держатель	Сталь Ст3сп (ГОСТ 535-2005)			245...260
Сварной шов	Электроды Э42 (ГОСТ 9467-75)			$R_{св} = 145$

Для сварного соединения в качестве характеристики прочности принято расчетное сопротивление углового сварного шва $R_{св}$, а не предел текучести, что соответствует нормам расчета стальных конструкций. Значение $R_{св} = 145$ определено согласно СП 16.13330.2017 [127], как наименьшее для двух значений, с учетом коэффициента условий работы:

- по металлу шва (для электродов Э42): $R = 180$ МПа;
- по металлу границы сплавления (для стали СТ3сп): $R = 162$ МПа.

Расчет выполнялся для двух режимов нагружения:

Режим 1. Рабочий режим: крутящий момент на валу $M_{кр} = 107$ Н·м; частота вращения 300 мин^{-1} ; нагрузка от сил резания приложена к каждому держателю; закрепление вала в местах установки подшипников.

Режим 2. Аварийный режим (заклинивание): крутящий момент на валу с учетом коэффициента динамичности $K_d = 1,5$: $M_{кр} = 160,5$ Н·м; имитация внезапной остановки вращения вала.

3.5. Методика оценки коррозионно-механического изнашивания режущих элементов

3.5.1. Методика измерения геометрических параметров режущих элементов при ускоренных испытаниях

Контроль геометрии режущей кромки режущих элементов осуществлялся методом снятия оттисков на свинцовые пластинки. Для этого использовался специальный прибор, представленный на рисунке 3.7.

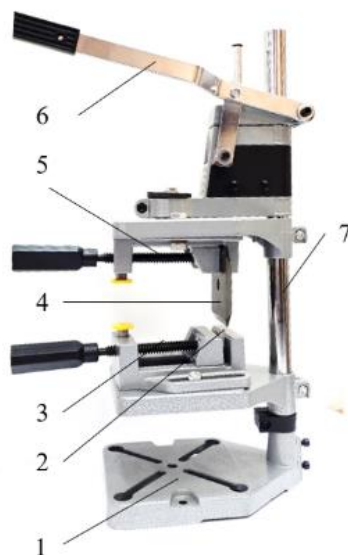


Рисунок 3.7 – Прибор для снятия оттисков профилей лезвия:

1 – опора; 2 – свинцовые, медные или алюминиевые пластины; 3 – зажим пластин; 4 – режущий элемент; 5 – зажим режущего элемента; 6 – рычаг; 7 – направляющая

Данный прибор спроектирован на основе существующих устройств, одно из таких устройств применяется в методике [11]. Он предназначен для получения точной копии (оттиска) режущей кромки на пластинке из мягкого металла.

Полученный оттиск в дальнейшем используется для измерения геометрических параметров лезвия (толщины режущей кромки $2\rho_k$, износа по нормали ΔC_k , угла заточки β_k) с помощью оптических приборов.

Толщину режущей кромки $2\rho_k$ определяли как среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$2\rho_k = \frac{\sum_{i=1}^n 2\rho_k^i}{n}, \quad (3.1)$$

где $2\rho_k^i$ – толщина режущей кромки образца i -го размера, мм; n – количество измерений.

Износ режущей кромки по нормали определяли как среднее арифметическое смещение профиля лезвия относительно исходного положения:

$$\Delta C_k = \frac{\sum_{i=1}^n (C_0^i - C_k^i)}{n}, \quad (3.2)$$

где C_0^i – расстояние от базовой линии до лезвия до испытаний, мм; C_k^i – то же после наработки, мм.

Угол заточки:

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_k^i}{n}, \quad (3.3)$$

где β_k^i – угол заточки образца i -го размера, град.

При необходимости, для визуализации анализа изменения геометрии режущей кромки в процессе изнашивания, а также для оценки характера распределения линейного износа по поверхности лезвия строят сетку изнашивания.

На рисунке 3.8 представлена сетка изнашивания профиля, а также схема, иллюстрирующая изменение основных геометрических параметров: толщины режущей кромки 2ρ , износа по ширине $\Delta\zeta$ и угла заточки β - для двухслойных (исполнение I) и однослойных (исполнение II) лезвий.

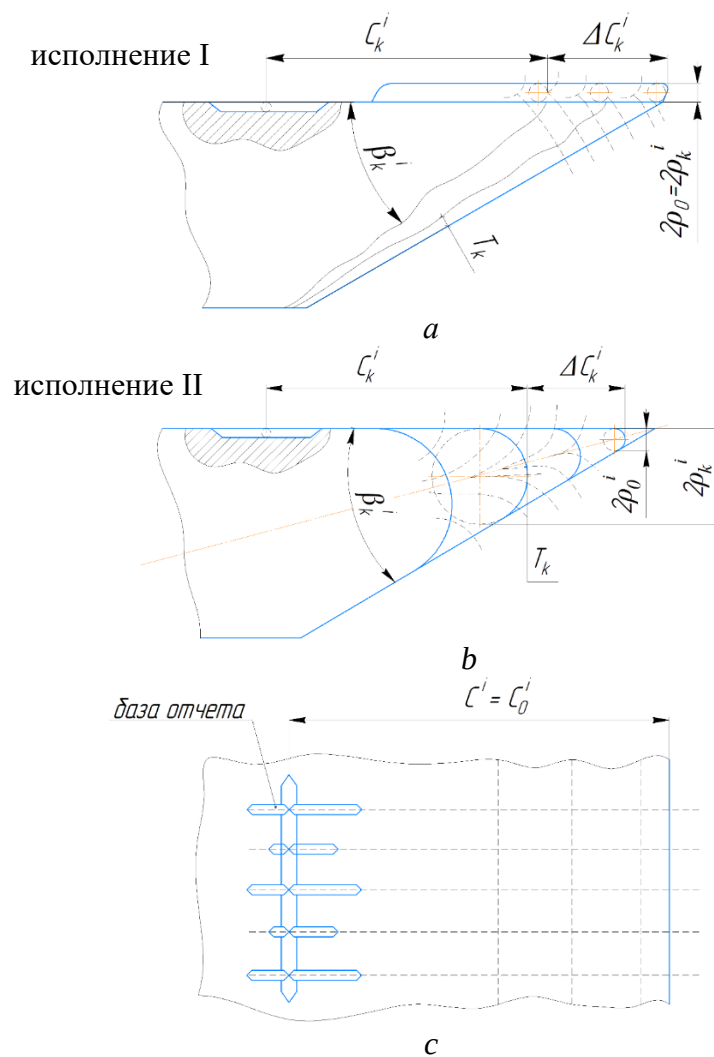


Рисунок 3.8 – Схема построения сетки изнашивания лезвия и изменения параметров режущей кромки: a – двухслойное лезвие; b – однослойное лезвие; c – база отсчета измерений

3.5.2. Методика оценки уровня механического изнашивания

Основным количественным критерием оценки износа служит потеря массы испытуемых образцов.

Массу исследуемых режущих элементов измеряли на высокоточных лабораторных весах с точностью 0,0001 г. (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Лабораторные весы Kaalee TF

Массовый износ определяли в зависимости от наработки с последующим построением регрессионной модели износа [54].

Потерю массы для каждого режущего элемента после i -го этапа испытаний вычисляли по формуле:

$$\Delta m_i = m_0 - m_i, \quad (3.4)$$

где m_0 – масса образца до испытаний, г; m_i – масса образца после i -го этапа наработки, г.

Среднюю потерю массы для группы однотипных образцов (эталонных и экспериментальных) определяли как среднее арифметическое выражение:

$$\overline{\Delta m} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta m_j, \quad (3.5)$$

где Δm_j – потеря массы одного конкретного образца, г; n – общее количество образцов в группе, г.

Интенсивность изнашивания (скорость потеря массы) рассчитывалась по формуле:

$$I = \frac{\overline{\Delta m}}{t}, \quad (3.6)$$

где t – время этапа испытаний, мин.

Для сравнительной оценки материалов и упрочняющих технологий рассчитывается коэффициент относительной износостойкости:

$$U = \frac{I_{\text{эт}} \cdot \rho_{\text{эт}}}{I_{\text{оп}} \cdot \rho_{\text{оп}}}, \quad (3.7)$$

где $I_{\text{эт}}$, $I_{\text{оп}}$ – интенсивность изнашивания эталонных и опытных образцов, г/мин;
 $\rho_{\text{эт}}$, $\rho_{\text{оп}}$ – плотность материалов эталонного и опытного образцов, г/см³.

Плотность материалов принимали по справочным нормативным данным [27].

3.5.3. Методика оценки уровня коррозионного изнашивания

Оценка коррозионного поражения поверхности режущих элементов проводилась в соответствии с ГОСТ 9.908-85 [39].

Для оценки коррозионного изнашивания режущих элементов, работающих в кормовых средах, наиболее информативным видом коррозии является коррозия пятнами.

Измерение степени коррозионного поражения поверхности проводили в период простоя установки (14 ч между циклами), когда режущие элементы находились в неподвижном состоянии во влажной кислой среде, что обеспечивало развитие электрохимической коррозии в статических условиях.

Степень поражения поверхности металла коррозией пятнами определялась по формуле [39]:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100\%, \quad (3.8)$$

где S_i – площадь i -го коррозионного пятна, мм²; n – количество пятен на поверхности; S – общая площадь поверхности образца, мм².

Для количественной оценки степени коррозионного поражения поверхности режущих элементов был принят метод сетки квадратов [39]. В исследовании принят шаг сетки 2 мм.

3.6. Методика исследования упрочненного покрытия

Измерения микроструктуры упрочненного покрытия проводили на микроскопе AXIO Observer.A1m (рис. 3.10), с использованием программы обработки и анализа изображений NEXSYS ImageExpert Pro3. Оценка микроструктуры и карбидной сетки осуществлялась по ГОСТ 5950-2000, неметаллических включений по ГОСТ 1778-2022 [29, 36].

Измерение микротвёрдости проводили в соответствии с ГОСТ 9450-76 [41], твердомером методом Виккерса – MicroMet (рис. 3.11).



Рисунок 3.10 - Микроскоп
AXIO Observer.A1m



Рисунок 3.11 – Твердомер
Виккерса МЕТОЛАБ 451

Толщина покрытия определялась по методу косых шлифов.

Металлографические исследования проводились в следующей последовательности:

1. Изготовление поперечных и косых шлифов образцов с покрытием.
2. Изучение микроструктуры покрытия на микроскопе;
3. Оценка микроструктуры и карбидной сетки по ГОСТ 5950-2000.
4. Оценка неметаллических включений по ГОСТ 1778-2022.
5. Измерение микротвердости покрытия по ГОСТ ГОСТ 9450-76.

6. Определение толщины покрытия методом косых шлифов.
7. Фиксация результатов.
8. Обработка результатов и построение кривых микротвердости.

3.7. Методика прогнозирования долговечности режущих элементов

Прогнозирование долговечности режущих элементов осуществлялось на основе разработанной математической модели (ф. 2.34) и результатов экспериментальных данных. С помощью коэффициента ускорения K_y выполнялся перерасчет в прогнозируемый эксплуатационный ресурс (ф. 2.36), что позволило прогнозировать ресурс режущих элементов в реальных условиях эксплуатации по результатам ускоренных стендовых испытаний.

На основании выполненных расчетов строились столбчатые диаграммы, визуализирующие результаты прогнозирования долговечности режущих элементов.

3.8. Выводы по третьей главе

В третьей главе диссертационных исследований представлена методика ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, позволяющая проводить ускоренную оценку их долговечности в условиях, приближенных к эксплуатационным. К общим выводам по третьей главе следует отнести:

1. Для проведения исследований и подтверждения методики приняты экспериментальные ножи, изготовленные из стали 9ХС без упрочнения и с поверхностным упрочнением (CrN).

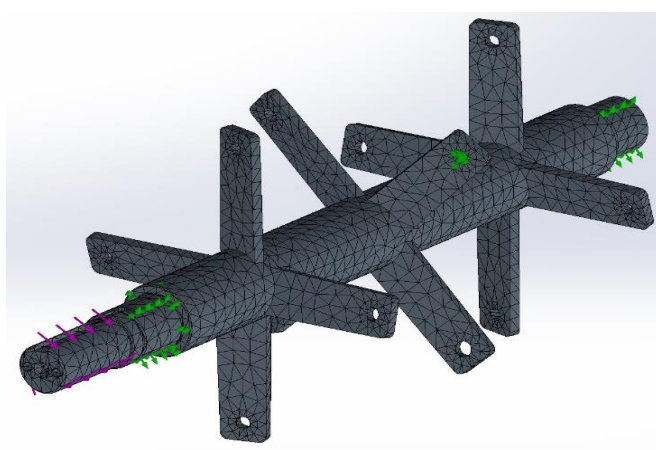
2. Разработана установка для ресурсных испытаний (патент RU 2842437 С1).

3. Приняты режимы испытаний: частота вращения – 300 мин^{-1} , общая наработка 56 ч. Состав субстрата включает в себя: древесные опилки фракцией 3-5 мм (30 % объема бункера); кварцевый песок фракцией 0,1-0,25 мм (10 % объема бункера); органические кислоты (молочная 0,8 %, уксусная 2 %, масляная 0,3 % от объема воды); вода – 3 л.

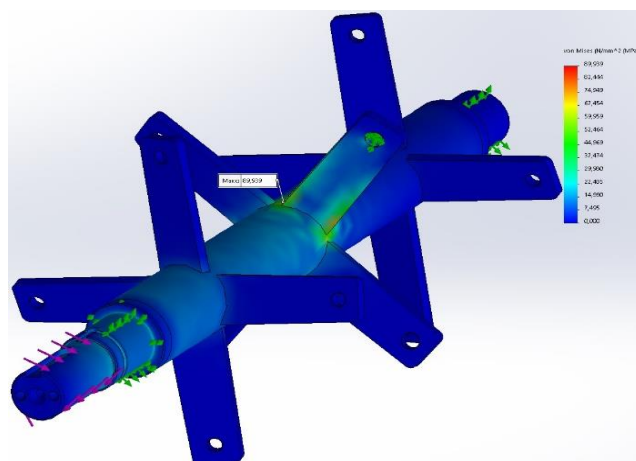
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

4.1. Результаты исследований прочностного расчёта

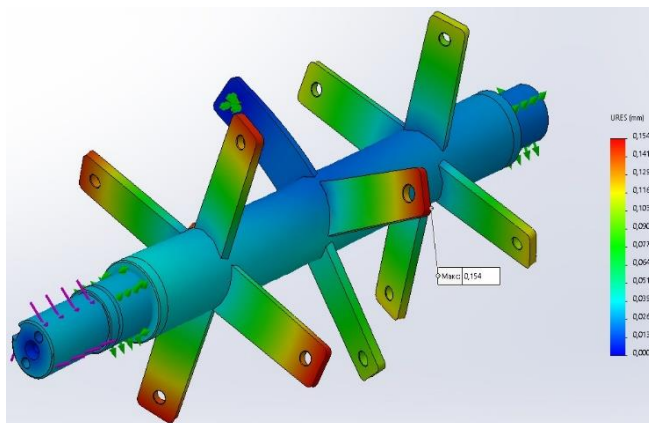
По результатам прочностного анализа установки для ресурсных испытаний режущих элементов, выполненного в программе SolidWorks Simulation (рис. 4.1) установлено, что наиболее напряженной зоной конструкции является сварное соединение держателя ножа с валом.



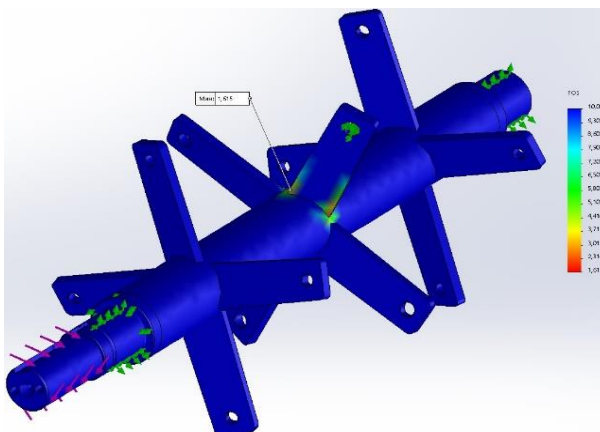
расчетная схема



напряжения



деформация под нагрузкой



запас прочности

Рисунок 4.1 – Результаты прочностного расчёта в программе Solidworks Simulation

Результаты расчёта показали, что максимальные эквивалентные напряжения (по Мизесу) в зоне сварного шва составляют $\sigma_{\max} = 90$ МПа.

По результатам сравнения полученного значения $\sigma_{\max}$ с расчетным сопротивлением сварного соединения $R_{\text{св}}$ ($R_{\text{св}} = 145$ МПа для электродов Э42 и стали Ст3сп) установлено, что максимальные напряжения не превышают допустимых и конструкция работает в области упругих деформаций:

$$\sigma_{\max} = 90 \text{ МПа} \leq \sigma_{\tau}$$

$$\sigma_{\max} = 90 \text{ МПа} \leq R_{\text{св}} = 145 \text{ МПа}.$$

Механические характеристики материалов, в том числе предел текучести σ_{τ} для материалов, из которых изготовлен вал и держатели установки приведены в таблице 3.1.

Максимальная суммарная деформация вала под нагрузкой составила – 0,154 мм (рис. 4.1 – деформация под нагрузкой). Полученное значение не превышает допустимых деформаций вала, с учетом частоты его вращения, следовательно не нарушается кинематика узла, отсутствует повышенное биение в процессе работы.

По результатам расчёта коэффициента запаса прочности установлено, что вал установки соответствует условиям прочности с запасом.

Полученное значение коэффициента запаса прочности $n_{\text{св}} = \frac{R_{\text{св}}}{\sigma_{\max}} = \frac{145}{90} \approx 1,612$ - превышает допустимые значения $[n_{\text{св}}]$. Допускаемые значения коэффициента запаса прочности для статических нагрузок $[n_{\text{св}}] = 1,3 \dots 1,5$ [127], что подтверждает надежность и безопасность конструкции.

Проведенные результаты прочностного расчета показывают, что вал установки и его сварные соединения соответствуют условиям прочности с необходимым запасом, что подтверждает надежность разработанной конструкции в проводимых режимах эксплуатации, включая аварийные ситуации (заклинивание).

4.2. Результаты расчёта оптимального угла установки режущих элементов

Держатели режущих элементов расположены под углом 90° к его оси (оси вала). Теоретически установлено, что если режущие элементы расположить под тем же самым углом 90° к оси вала установки, то в процессе работы будут

отсутствовать осевые смещения субстрата, в результате чего образуется канавка и режущие элементы не будут изнашиваться.

При установке режущих элементов под углом β , относительно держателя, возникает сила резания $F_{рез}$, раскладывающаяся на составляющие: осевую F_a , и радиальную F_r (ф. 2.9), что позволяет смешивать субстрат и обеспечить износ режущих элементов.

Разработанная установка предназначена для испытаний на коррозионно-механическое изнашивание режущих элементов, а не для приготовления кормовой смеси. Главная задача – обеспечение достаточного уровня перемешивания субстрата, исключить сепарацию компонентов, обеспечить равномерный износ ножей и исключить образование застойных зон.

Для обеспечения равномерного распределения субстрата в бункере установки рассмотрим различные варианты угла наклона режущих элементов β .

Для обоснования угла наклона режущих элементов выполнен анализ относительных величин $\cos \beta$ и $\sin \beta$ (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Влияние угла наклона режущих элементов на распределение усилий.

β , град	$F_r/F_{рез}$ (%)	$F_a/F_{рез}$ (%)	Примечание
0°	1,000 (100%)	0 (0%)	происходит чистое резание материала, отсутствует перемешивание, образовывается канавка
5°	0,996 (99,6%)	0,087 (8,7%)	перемешивание субстрата слабое, наблюдается чистое резание, образование застойных зон
10°	0,985 (98,5%)	0,174 (17,4%)	Риск осаждения тяжелых фракций из-за незначительной осевой нагрузки
15°	0,966 (96,6%)	0,259 (25,9%)	Оптимальный угол: преобладает сила резание и достаточное перемешивание субстрата, отсутствие застойных зон и отсутствие канавки
20°	0,940 (94,0%)	0,342 (34,2%)	Снижается сила резания, перемещение растёт
25°	0,906 (90,6%)	0,423 (42,3%)	Происходят потери резания
30°	0,866 (86,6%)	0,500 (50%)	Половина силы тратится на перемешивание, что не удовлетворяет условиям на испытания на износ

На основании анализа относительных величин радиальной (режущей) и осевой (транспортирующей) составляющих силы резания, а также количественной оценки поведения субстрата, установлено:

1. Углы 0° и 5° обеспечивают высокую режущую способность (100% и 99,6%), однако осевое перемещение практически отсутствует (0% и 8,7%). Это приводит к образованию локальной канавки в зоне резания, застойным зонам и отсутствию циркуляции субстрата, что не пригодно для испытаний на износ.

2. Угол 10° - режущая способность остается высокой (98,5%), однако осевая нагрузка составляет лишь 17,4%, что создает риск осаждения тяжелых фракций (песка) из-за недостаточного перемешивания. Данный угол недостаточен для обеспечения равномерного распределения компонентов.

3. Угол 15° - является оптимальным углом. Режущая способность сохраняется на уровне 96,6% (потеря всего 3,4 % по сравнению с 0°). Осевая нагрузка достигает 25,9%, что обеспечивает достаточное перемешивание субстрата, отсутствие застойных зон и исключение образования канавки.

4. При увеличении углов 20° , 25° и 30° режущая способность снижается до 94%, 90,6% и 86,6% соответственно. При угле 30° половина силы резания затрачивается на перемешивание, что не обеспечивает полноценные испытания на износ.

Таким образом, на основании анализа установлено, что угол наклона режущих элементов $\beta = 15^\circ$ является оптимальным углом.

Для создания замкнутых циркуляционных контуров в каждой рабочей зоне вала реализовано чередование направлений наклона ножей $+15^\circ$ и -15° (рис. 4.2)

Ножи с углом $+15^\circ$ и -15° толкают материал вправо, и -15° и -15° толкают материал влево. В каждой рабочей зоне установлены четыре ножа с чередованием $+15^\circ$, -15° , $+15^\circ$, -15° и т.д. это обеспечивает интенсивность циркуляции внутри зоны, превышая силу резания одного ножа, что гарантирует равномерное перемешивание.

Для непрерывного перемешивания, также необходимо чтобы зоны влияния ножей перекрывались. Зона активного влияния одного ножа длиной $L_n = 80$ мм при угле наклона $\beta = 15^\circ$ определяется:

$$L_{вл} = L_n(\sin\beta + k \cdot \cos\beta) = 80(\sin 15^\circ + 0,5 \cdot \cos 15^\circ) \approx 60 \text{ мм}, \quad (4.1)$$

где L_H – длина ножа, мм; k – эмпирический коэффициент инерционности ($0,3 \leq k \leq 0,7$).

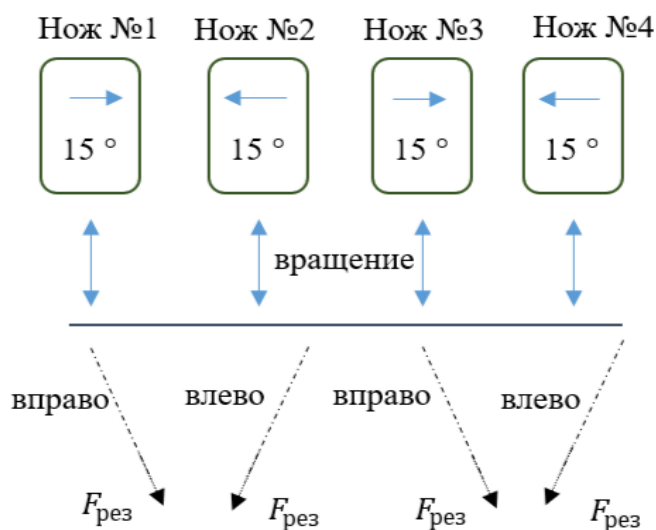


Рисунок 4.2 – Схема чередования углов крепления режущих элементов в одной рабочей зоне вала

Условие перекрытия зон двух соседних ножей:

$$L_{\text{между}} \leq L_{\text{max}}, \quad (4.2)$$

где $L_{\text{между}}$ – фактическое расстояние между осями двух соседних ножей, мм;

L_{max} – максимальное допустимое расстояние между осями двух соседних ножей, мм.

Максимальное допустимое расстояние между осями двух соседних ножей (ф. 2.15):

$$L_{\text{max}} = 2 \cdot L_{\text{вл}} = 2 \cdot 60 = 120 \text{ мм.}$$

Таким образом, расстояния между соседними держателями удовлетворяют условию $L_{\text{между}} \leq 120$, следовательно мертвые зоны отсутствуют, материал циркулирует в каждой рабочей зоне.

Равномерное распределение субстрата при установленном угле наклона зуба $\beta = 15^\circ$ и его чередованием от $+15^\circ$, -15° в каждой рабочей зоне вала установки, с учетом расстояния между соседними держателями подтверждено видеоматериалами, прикрепленными к презентации диссертационной работы.

4.3. Результаты исследований упрочненного CrN – покрытия стали 9ХС¹⁴

Металлографический анализ полученных CVD-методом образцов (рис. 4.3), принятых для сравнительной оценки исследуемых образцов, выявил наличие структурных составляющих в виде нитридов и карбонитридов (балл 1а, точечные включения, размером 5-25 мкм), формирующих упрочняющую фазу, а также единичных силикатных включений (балл 2а, размер 3-10 мкм), связанных с остаточными продуктами реакций.

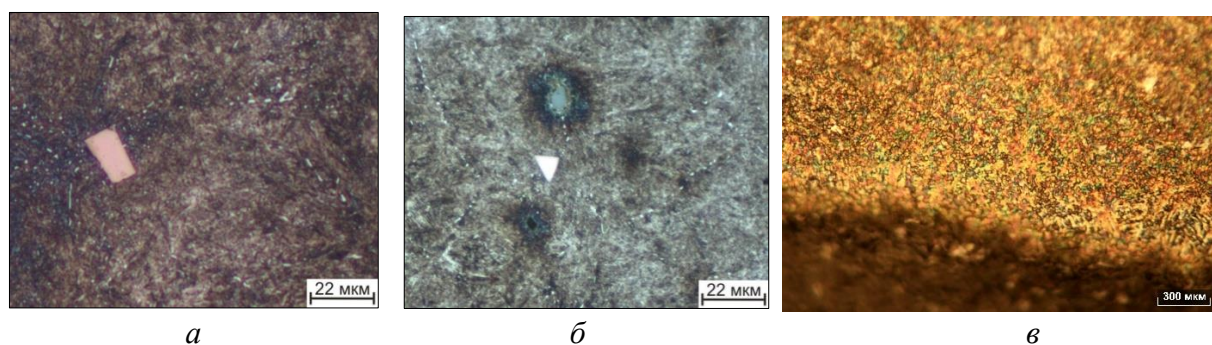


Рисунок 4.3 – Микроструктура покрытия стали 9ХС после CVD-осаждения:
а – нитриды и карбонитриды (x450) место 2; б - силикаты и нитриды (x450)
место 3; в – общий вид упрочненного слоя (x100)

Результаты измерений микротвердости (рис. 4.4, приложение Б, табл. 1) показали, что микротвердость нитридохромового покрытия стали 9ХС составляет 600 ед. $HV_{0,05}$; микротвердость основы материала (сталь 9ХС без покрытия) ≈ 300 ед. $HV_{0,05}$; толщина покрытия CrN составляет 50 мкм.

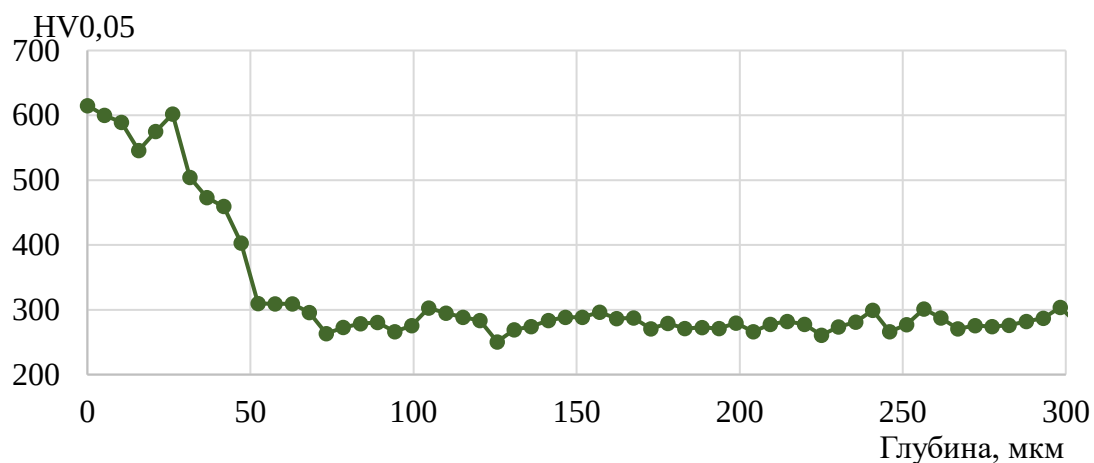
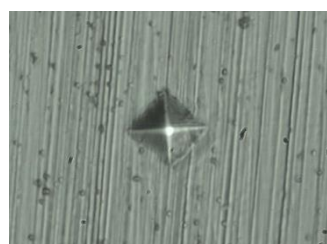


Рисунок 4.4 – Результаты измерений микротвердости упрочненного CrN – покрытия стали 9ХС

¹⁴ Выполнено совместно с научным руководителем Скороходовым Д.М.

На рисунке 4.5 показан отпечаток промера №10 и отпечаток промера №59 при увеличении $\times 1000$.



Отпечаток №10 ($\times 1000$)



Отпечаток №59 ($\times 1000$)

Рисунок 4.5 – Результаты отпечатков микротвердости

Сводная статистика результатов средних значений измерения микротвердости приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сводная статистика средних значений результатов измерения микротвердости

Параметр	Среднее	Откл	Мин	Макс
$D_{\text{сред}}, \text{мкм}$	17,6	0,2	12,4	22,0
$D_{\text{макс}}, \text{мкм}$	17,9	0,2	12,8	22,9
$D_{\text{мин}}, \text{мкм}$	17,4	0,2	12,0	21,0
HV	311,0	11,4	192,0	602,1

По результатам статической обработки измерений микротвердости и геометрических параметров отпечатков установлено, что среднее значение микротвердости составляет 311,0 HV при среднеквадратичном отклонении 11,4 HV, что свидетельствует об однородности свойств по объему образца. Разброс значений микротвердости находится в диапазоне от 192,0 HV до 602,1 HV. Максимальное значение (602,1 HV) соответствует локальным участкам с упрочняющими фазами (нитриды и карбонитриды), минимальное (192,0 HV) – переходным зонам. Геометрические параметры отпечатков $D_{\text{сред}}$, $D_{\text{макс}}$, $D_{\text{мин}}$ характеризуются низкими значениями отклонений ($\pm 0,2$ мкм), что подтверждает корректность проведенных измерений.

4.4. Результаты исследований износа геометрических параметров

В ходе ускоренных ресурсных испытаний проведена оценка изменения геометрических параметров режущей кромки для двух типов образцов: эталон (базовый) – сталь 9ХС без упрочнения и упрочненный образец – сталь 9ХС с CVD-покрытием CrN.

По результатам измерений установлены линейные зависимости (рис. 4.6, рис. 4.7 и рис. 4.9) изменения геометрических параметров режущей кромки в зависимости от наработки, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,96...0,99$, что подтверждает достоверность полученных данных.

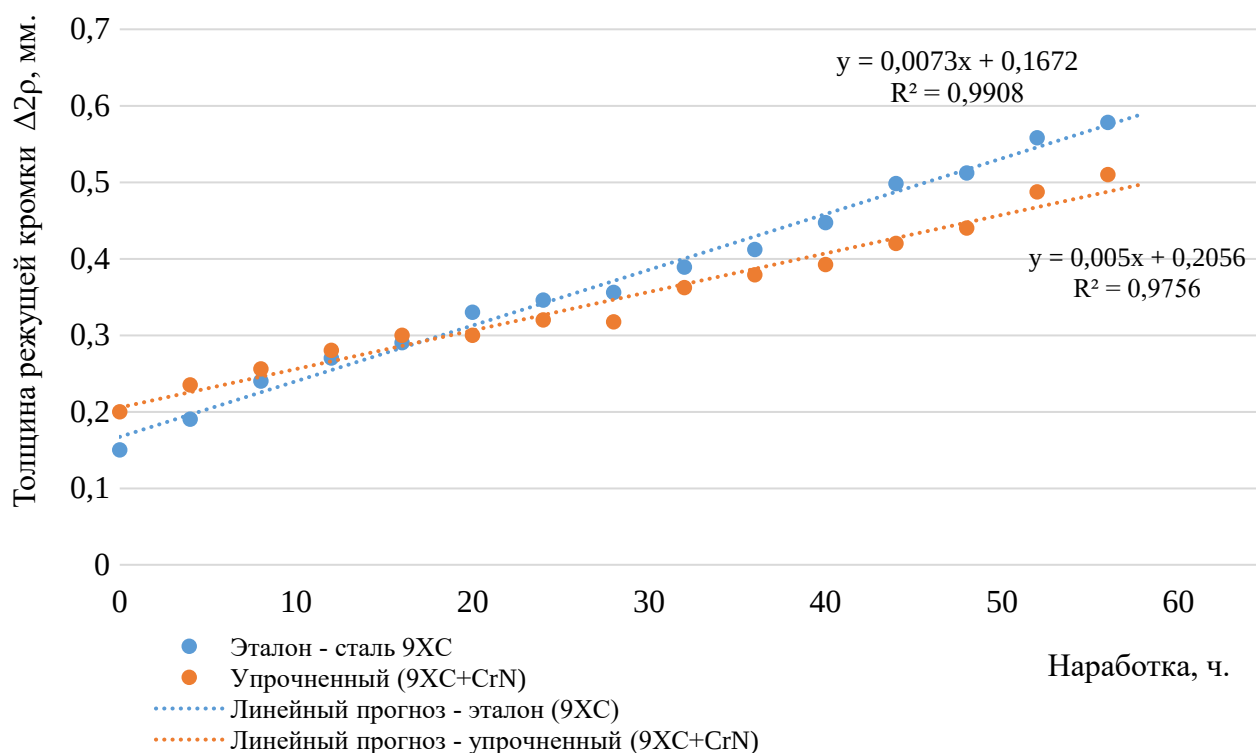


Рисунок 4.6 – Результаты исследований износа толщины режущей кромки $\Delta 2\rho$, мм от наработки, ч.

Установлено, что общий прирост толщины режущей кромки $\Delta 2\rho$ за наработку 56 ч составляет: для эталонного образца (сталь 9ХС) $\Delta 2\rho_{\text{эт}} = 0,428$ мм; для упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) $\Delta 2\rho_{\text{упр}} = 0,31$ мм (рис. 4.6, табл. 4.3, приложение Б, табл. 2).

Таблица 4.3 – Общий прирост износа толщины режущей кромки $\Delta 2\rho$

Наработка, ч.	Толщина режущей кромки, мм	
	Эталон (сталь 9XC)	Упрочненный (сталь 9XC+CrN)
0	0,15	0,20
56	0,578	0,51
Прирост за 56 ч.	+0,428 мм	+0,31 мм

При этом средняя скорость затупления составила:

- для эталонного образца (сталь 9XC) - $v_{\text{зат.эт}} = 0,428/56 = 0,00764$ мм/ч;
- для упрочненного образца (сталь 9XC+CrN) - $v_{\text{зат.упр.}} = 0,31/56 = 0,00554$

мм/ч.

Применение CVD-покрытия CrN позволяет снизить скорость затупления режущей кромки в $v_{\text{зат.эт}} / v_{\text{зат.упр.}} = 0,00764 / 0,00554 \approx 1,38$ раза, что свидетельствует о повышенной абразивной стойкости упрочненного слоя.

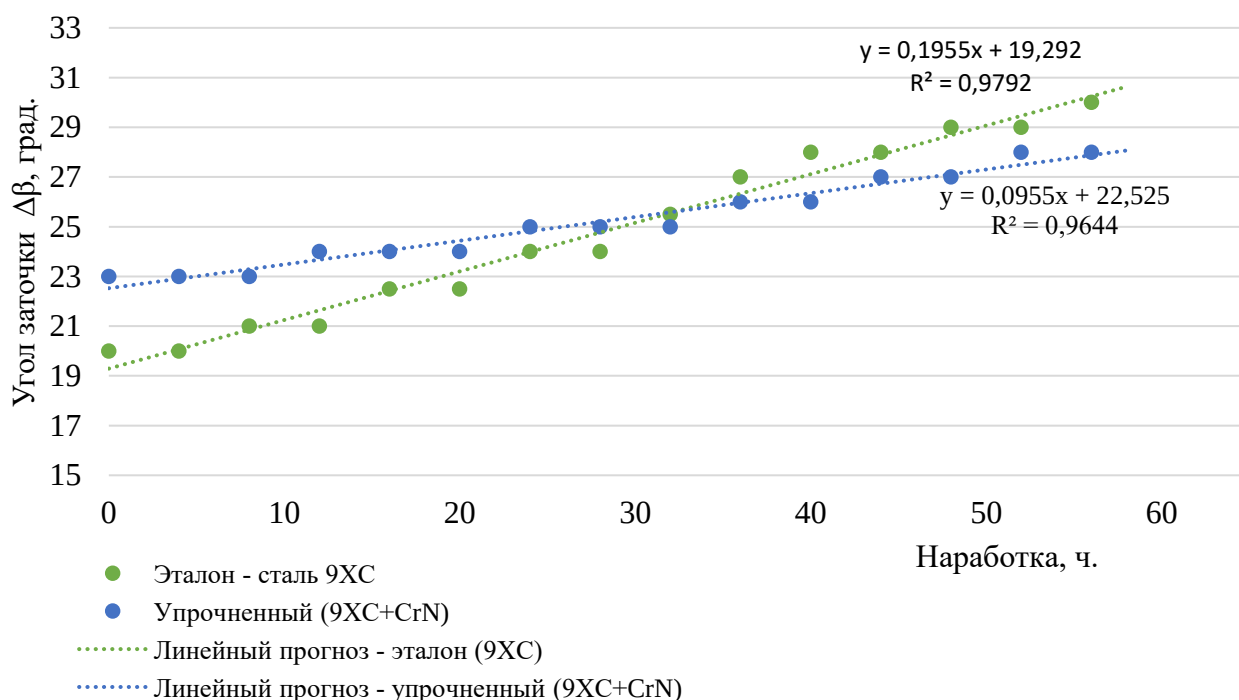


Рисунок 4.7 – Результаты изменения угла заточки $\Delta\beta$, град от наработки, ч

Установлено, что общий прирост угла заточки $\Delta\beta$ за наработку 56 ч составляет: для эталонного образца (сталь 9XC) $\Delta\beta_{\text{эт}} = 30 - 20 = 10$ град; для

упрочненного образца (сталь 9XC+CrN) $\Delta\beta_{\text{упр}} = 28 - 23 = 5$ град (рис. 4.7, приложение Б, табл. 3).

При этом средняя скорость увеличения угла заточки составила:

- для эталонного образца (сталь 9XC) - $v_{\beta, \text{эт}} = 10/56 = 0,179$ град/ч;

- для упрочненного образца (сталь 9XC+CrN) - $v_{\beta, \text{упр.}} = 5/56 = 0,089$ град /ч.

Применение CVD-покрытия CrN позволяет снизить скорость увеличения угла заточки $v_{\beta, \text{эт}} / v_{\beta, \text{упр.}} = 0,179 / 0,089 \approx 2$ раза, что свидетельствует о эффективности покрытия режущих элементов, работающих в условиях коррозионно-абразивного изнашивания.

На рисунке 4.8 представлены результаты снятия оттисков режущих элементов, с увеличением изображения оптическим прибором, до испытаний и в конце испытаний.

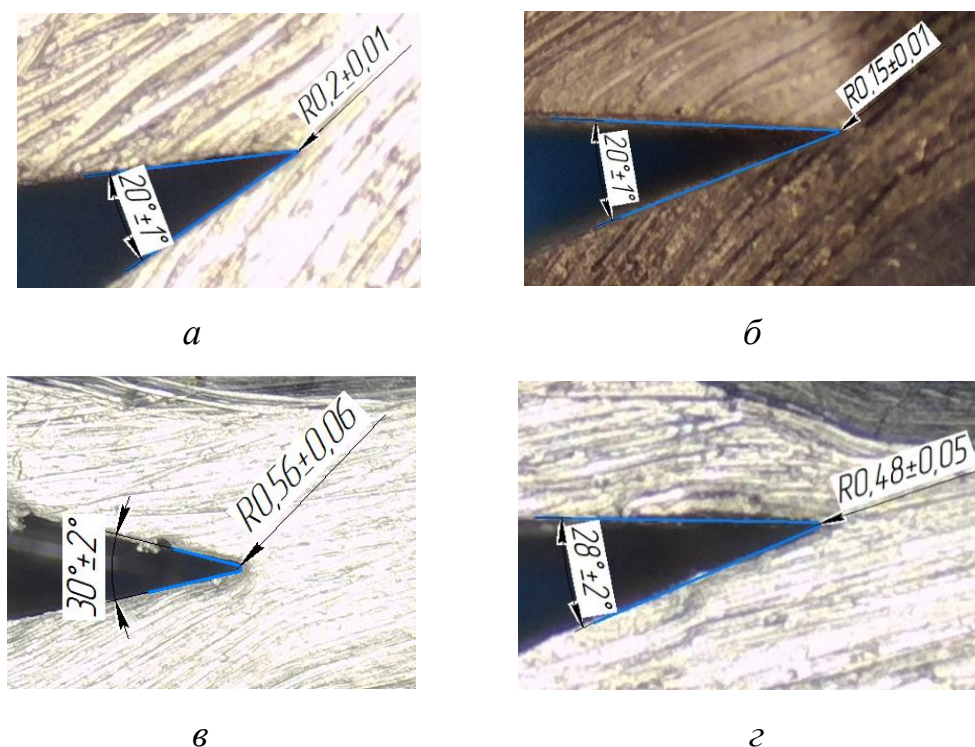


Рисунок 4.8 – Результаты снятия оттисков режущих элементов:

а – эталонный образец, при наработке 0 ч; *б* – упрочненный образец, при наработке 0 ч; *в* – эталонный образец, при наработке 56 ч; *г* – упрочненный образец, при наработке 56 ч

Установлено, что общий прирост износа по нормали ΔC за наработку 56 ч составляет: для эталонного образца (сталь 9ХС) $\Delta C_{\text{эт}} = 0,91$ мм; для упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) $\Delta C_{\text{упр}} = 0,56$ мм (рис. 4.9, приложение Б, табл. 4).

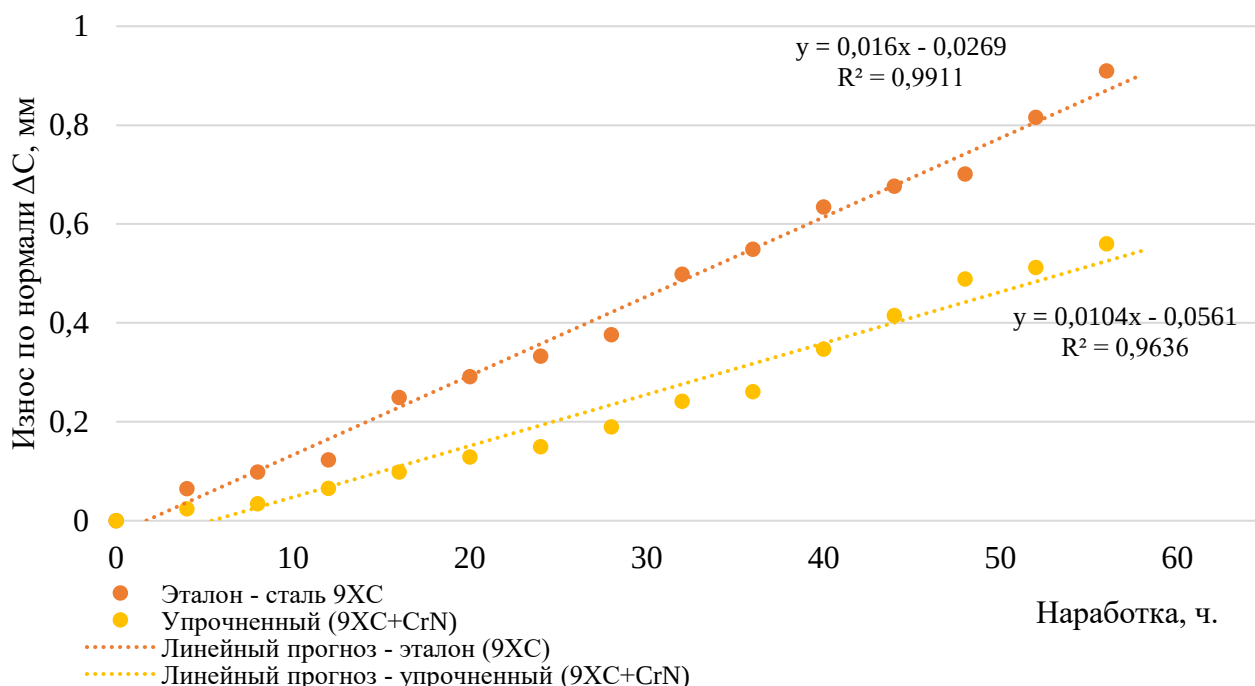


Рисунок 4.9 – Результаты исследований износа по нормали ΔC , мм от наработки, ч

Установлено, что общий прирост износа по нормали ΔC за наработку 56 ч составляет: для эталонного образца (сталь 9ХС) $\Delta C_{\text{эт}} = 0,91$ мм; для упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) $\Delta C_{\text{упр}} = 0,56$ мм (рис. 4.9).

При этом, средняя скорость изнашивания составила: для эталонного образца (сталь 9ХС) - $v_{\text{из. эт}} = 0,91/56 = 0,01625$ мм/ч; для упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) - $v_{\text{из. упр.}} = 0,56/56 = 0,01$ мм/ч.

По результатам исследований установлено снижение скорости изнашивания в $v_{\text{из. эт}} / v_{\text{из. упр.}} = 0,01625 / 0,01 \approx 1,6$ раза по сравнению с эталоном.

4.5. Результаты исследований механического изнашивания

По результатам исследования механического изнашивания режущих элементов машин для животноводства установлено, что за 56 ч суммарной

наработки абсолютная потеря массы эталонного образца (сталь 9ХС) составила $\Delta m_{\text{эт}} = 4,939$ г, при этом абсолютная потеря массы упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) составила $\Delta m_{\text{упр}} = 2,110$ г. (рис. 4.10, приложение Б таблица 5).

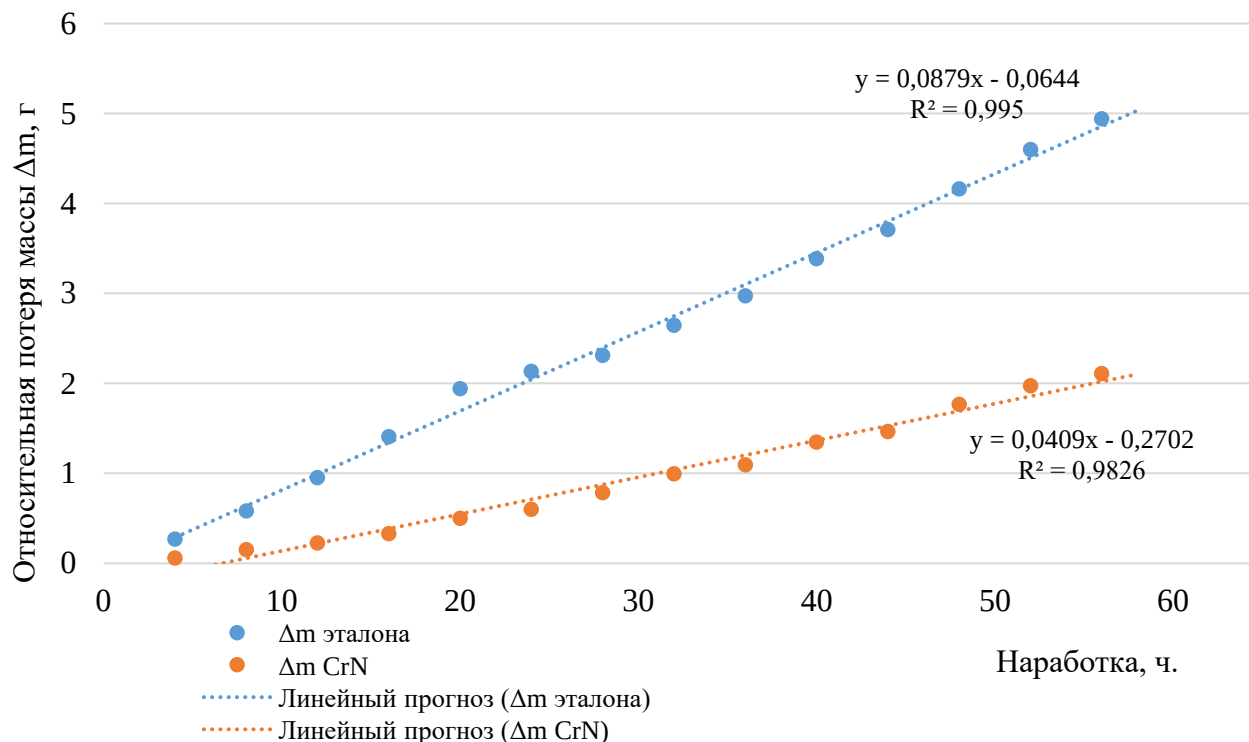


Рисунок 4.10 – Результаты исследований относительной потери массы режущих элементов Δm , г от наработки, ч

Установлено, что абсолютная потеря массы упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) в 2,3 раза меньше, чем у эталона (сталь 9ХС) ($\Delta m_{\text{эт}} / \Delta m_{\text{упр}} = 4,939 / 2,110 \approx 2,3$).

Относительная потеря массы (в процентах от исходной m_0) составила: для эталонного образца (сталь 9ХС) $\delta m_{\text{эт}} = (\Delta m_{\text{эт}} / m_{0,\text{эт}}) 100\% = (4,939 / 170,4279) 100\% = 2,90\%$; для упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) $\delta m_{\text{упр}} = (\Delta m_{\text{упр}} / m_{0,\text{упр}}) 100\% = (2,110 / 182,9825) 100\% = 1,15\%$.

Установлено, что относительная потеря массы упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) в 2,52 раза меньше, чем у эталонного ($\delta m_{\text{эт}} / \delta m_{\text{упр}} = 2,90 / 1,15 = 2,53$).

При этом, средняя скорость потери массы за весь период испытаний составила: для эталонного образца (сталь 9ХС) - $v_{\text{из. эт}} = 4,939 / 56 = 0,0882$ г/ч; для упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN) - $v_{\text{из. упр.}} = 2,110 / 56 = 0,0377$ г/ч.

По результатам исследований установлено снижение скорости изнашивания в $v_{\text{из. эт}} / v_{\text{из. упр.}} = 0,0882 / 0,0377 \approx 2,34$ раза упрочненного режущего элемента по сравнению с не упрочненным.

4.6. Результаты исследований коррозионного изнашивания

Исследования коррозионного поражения поверхности режущего элемента осуществлялось после простоя оборудования (14 ч. между циклами).

Результаты измерений степени коррозионного поражения G поверхности режущих элементов представлены на рисунке 4.11 и в приложении Б таблица 6.

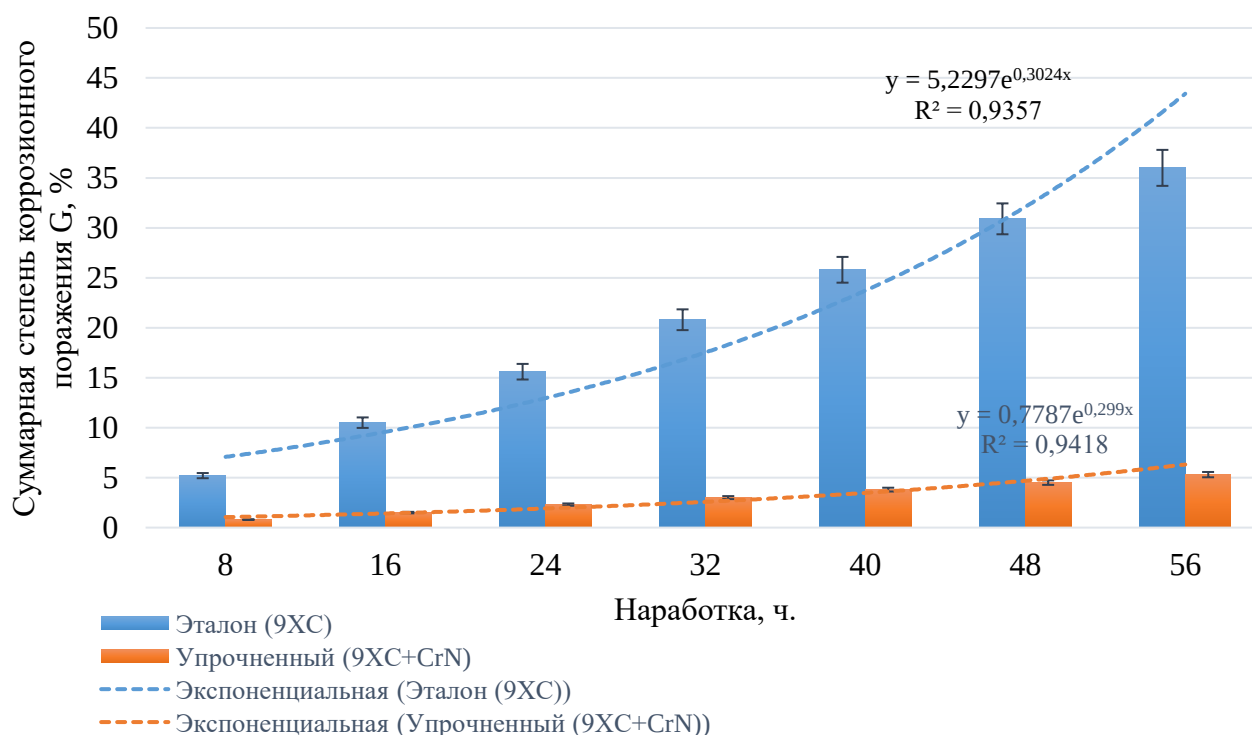


Рисунок 4.11 – Результаты исследований суммарной степени коррозионного поражения поверхности G %, от наработки, ч

По результатам исследования установлено, что на эталонном образце коррозия развивается интенсивно: после третьего цикла (24 ч.) степень поражения

достигла 15,6%. К 56 ч. площадь коррозии составила 1800 мм² (36%), определено 210 количество коррозионных пятен, средняя площадь пятна составила 8,6 мм². Упрочненные CrN-покрытием образцы показали высокую коррозионную стойкость: за 56 ч. степень поражения составила 5,3% (265 мм²), количество пятен – 55, средняя площадь 4,8 мм².

Установлено, что у упрочненных ножей покрытием снижается степень коррозионного поражения в 6,8 раза ($36/5,3 \approx 6,8$).

4.7. Результаты исследований прогнозирования долговечности режущих элементов

Ресурс режущего элемента T_p определяли по первому достигнутому из установленных критериев предельного состояния.

По результатам прогнозирования долговечности режущих элементов, установлено: стендовый ресурс эталонного образца (сталь 9ХС), определенный по критерию коррозионного поражения ($G_{кр} = 15\%$), составил 41 ч.; упрочненный CrN-покрытием - достиг предельного состояния при наработке 54 ч. (рис. 4.12, рис. 4.13).

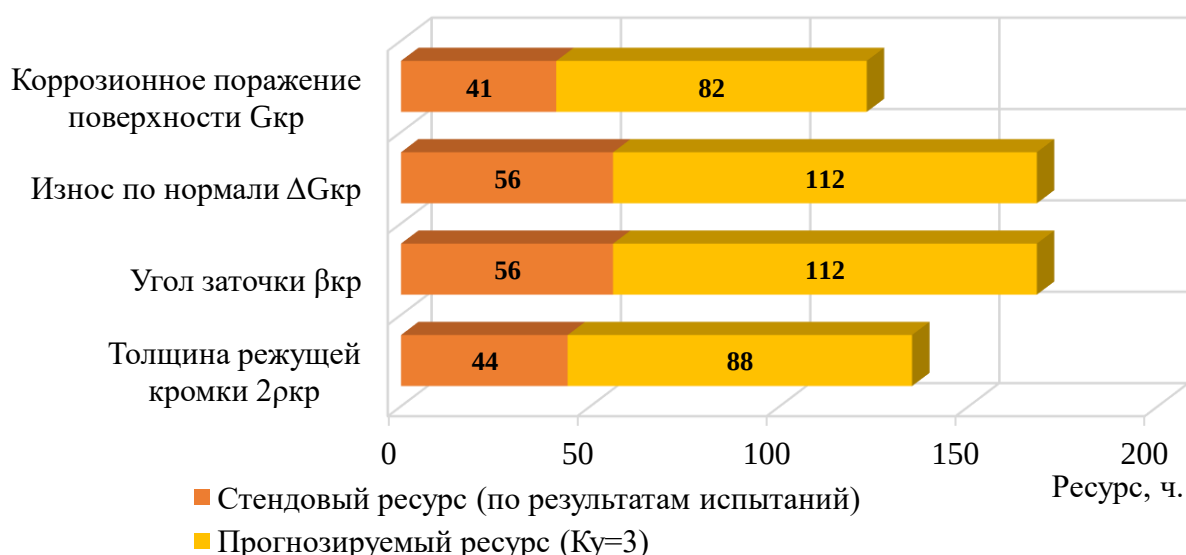


Рисунок 4.12 – Результаты исследований прогнозирования долговечности режущих элементов эталонного образца (сталь 9ХС)

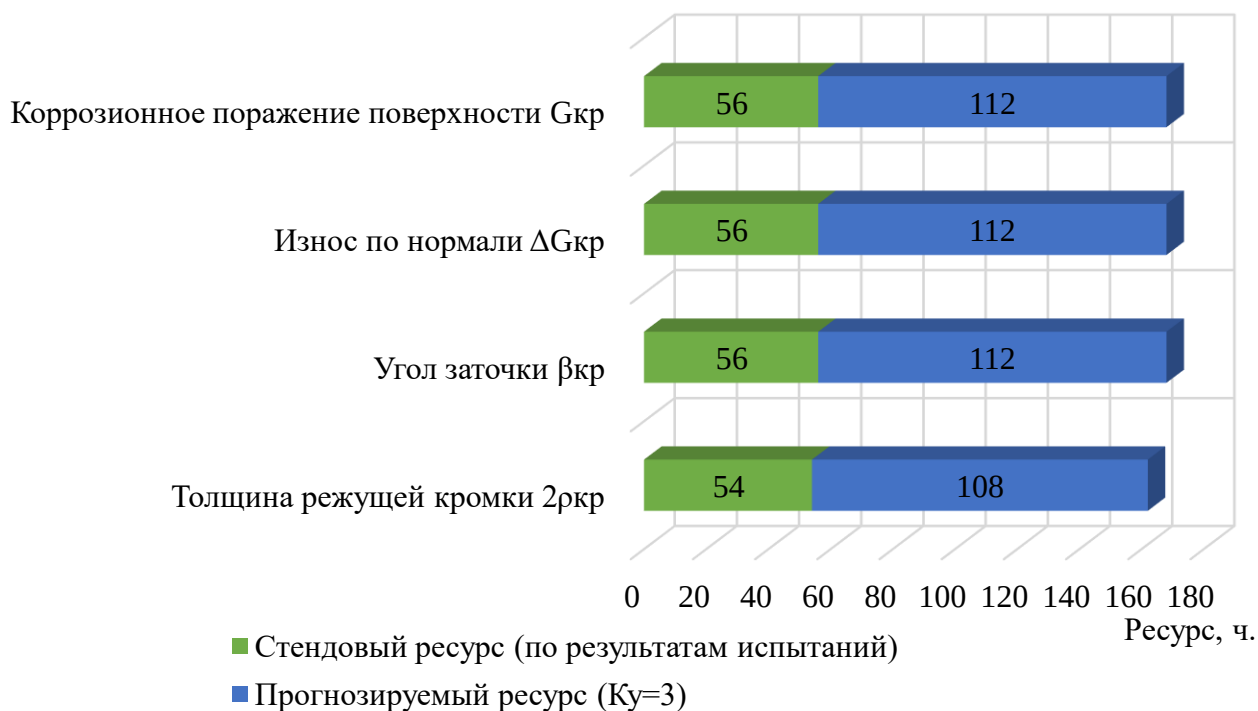


Рисунок 4.13 – Результаты исследований прогнозирования долговечности режущих элементов упрочненного образца (сталь 9ХС+CrN)

С учетом коэффициента ускорения $K_u = 3$, прогнозируемый ресурс в условиях эксплуатации составляет: эталон – 123 ч.; упрочненный – 162 ч.

Массовый износ составил менее 10% от общей массы образцов, следовательно, он не является лимитирующим фактором при прогнозировании долговечности режущих элементов.

Результаты исследований установили, что упрочненный нож в 1,32 раза превосходит по прогнозируемому ресурсу эталонных (базовых) режущих элементов.

Разработанная методика ускоренных ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства показала свою эффективность и достоверность, что подтверждают результаты исследований. Она позволяет: определять прогнозируемый эксплуатационный ресурс с высокой степенью достоверности; выявлять лимитирующие факторы долговечности; объективно сравнивать эффективность различных методов упрочнения режущих элементов.

4.8. Выводы по четвертой главе

1. Прочностной анализ подтвердил работоспособность разработанной установки: максимальные напряжения в сварном соединении составляют $\sigma_{\max} = 90 \text{ МПа}$, запас прочности сварного соединения $n_{CB} = 1,6$, что превышает допустимые значения, следовательно запас прочности обеспечен.

2. Установлен оптимальный угол наклона режущих элементов $\beta = 15^\circ$, с чередованием направлений угла $-15^\circ / +15^\circ$, что обеспечивает 96,6% режущей способности при достаточном смешивании субстрата.

3. Доказано, что CVD-покрытие CrN на стали 9ХС содержит упрочняющие фазы в виде нитридов и карбонитридов. Установлено что микротвердость упрочненного слоя в 2 раза выше основы материала, а его толщина составляет 50 мкм.

4. Экспериментально установлены кинетические зависимости изменения геометрических, массовых и коррозионных параметров изнашивания от наработки. Установлено, что CrN-покрытие обеспечивает: снижение скорости затупления режущей кромки в 1,38 раза; снижение скорости увеличения угла заточки в 2 раза; снижение скорости износа по нормали в 1,6 раза; снижение степени коррозионного поражения в 6,8 раза; снижение относительной потери массы в 2,4 раза.

5. Определен, что прогнозируемый ресурс упрочненных образцов в эксплуатационных условиях составляет 162 ч., что в 1,32 раза выше, чем у неупрочненных режущих элементов.

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

5.1. Экономическая эффективность применения разработанной методики

Экономическая эффективность [81, 145], применения разработанной методики проводилась путем сравнения затрат на проведение натурных эксплуатационных испытаний и разработанной методики.

Натурные эксплуатационные испытания, при которых образцы режущих элементов устанавливаются на шнек смесителя-кормораздатчика, в реальных условиях сельскохозяйственного предприятия. В этом случае испытания проводятся в течении полного срока службы режущего элемента (до достижения предельного износа). Продолжительность таких испытаний как правило составляет несколько месяцев непрерывной работы смесителей-кормораздатчиков.

В разработанной методике ускоренные ресурсные испытания проводятся на установке, с применением субстрата, моделирующего коррозионно-механическое воздействие, с форсированием режимов по концентрации абразива, кислотности, влажности и скорости резания. Продолжительность одной серии испытаний сокращена до нескольких недель.

Задачей расчета экономической эффективности является обоснование эффективности новой методики по сравнению с традиционными испытаниями.

Исходные данные для определения экономической эффективности приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные для определения экономической эффективности

Параметр	Обозначение	Значение	Примечание
Натурные эксплуатационные испытания			
Продолжительность одной серии испытаний	$T_{\text{эспл}}$	4320 ч.	6 месяцев работы смесителя-кормораздатчика
Стоимость 1 ч работы	$C_{\text{ч}}$	2500 руб.	Среднерыночная стоимость услуг испытательных центров
Количество образцов в серии	n	12 шт.	Четыре группы по три образца

<i>Продолжение таблицы 5.1</i>			
Стоимость одного образца режущего элемента	$C_{обр}$	1250 руб.	Стоимость экспериментального образца
Коэффициент накладных расходов	$k_{накл}$	30%	Амортизационные и др. расходы,
Годовое количество серий (план испытательного центра)	N	4	Консервативная оценка
Ускоренные испытания (разработанная методика)			
Продолжительность одной серии испытаний	$T_{уск}$	56 ч.	14 циклов испытаний
Стоимость 1 ч работы	$C_ч$	2500 руб.	Та же ставка
Количество образцов в серии	n	12 шт.	То же количество
Стоимость одного образца режущего элемента	$C_{обр}$	1200 руб.	Та же стоимость
Коэффициент накладных расходов	$k_{накл}$	30%	Тот же процент
Годовое количество серий (план испытательного центра)	N	4	Такое же количество

Методика экономического расчета базируется на подходах, изложенных в работах [81, 145]. В соответствии с рекомендациями данных авторов и классическим расчётом экономической эффективности выполнен сравнительный анализ затрат на проведение ресурсных испытаний.

Стоимость работ лаборатории:

$$C_{раб} = T_{экспл(уск)} \cdot C_ч, \quad (5.1)$$

где $T_{экспл(уск)}$ – продолжительность одной серии испытаний, соответственно эксплуатационных и ускоренных, ч.; $C_ч$ – стоимость одного часа работы, руб.

Стоимость работ лаборатории для натурных эксплуатационных испытаний составляет:

$$C_{раб,экспл} = 4320 \cdot 2500 = 10\,800\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость работ лаборатории для ускоренных испытаний составляет:

$$C_{раб,уск} = 56 \cdot 2500 = 140\,000 \text{ руб.}$$

Общая стоимость образцов определяется:

$$C_{обр.общ} = n \cdot C_{обр}, \quad (5.2)$$

где n – количество образцов в серии, шт.; $C_{обр}$ – стоимость одного образца режущего элемента, руб.

Для нашего случая, при общем числе испытываемых режущих элементов (12 шт.), испытываемых одновременно в рамках одной серии испытаний, общая стоимость образцов составит:

$$C_{обр.общ} = 12 \cdot 1250 = 15\,000 \text{ руб.}$$

Накладные расходы:

$$C_{накл} = C_{раб} \cdot k_{накл}, \quad (5.3)$$

где $C_{раб}$ – прямые затраты на работу лаборатории (включая зарплату персонала, амортизацию оборудования, энергозатраты, расходные материалы, но не учитывая стоимость образцов), руб.; $k_{накл}$ – коэффициент накладных расходов ($k_{накл} = 0,30$ (30%)).

Накладные расходы для натурных эксплуатационных испытаний составляют:

$$C_{накл.экспл.} = 10\,800\,000 \cdot 0,3 = 3\,240\,000 \text{ руб.}$$

Накладные расходы для ускоренных испытаний составляют:

$$C_{накл.уск} = 140\,000 \cdot 0,3 = 42\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на проведение одной серии испытаний определяются:

$$Z'_{сум} = C_{раб} + C_{обр.общ} + C_{накл}. \quad (5.4)$$

Для натурных эксплуатационных испытаний суммарные затраты на проведение одной серии испытаний составят:

$$Z'_{сум.экспл} = 10\,800\,000 + 15\,000 + 3\,240\,000 \approx 14 \text{ млн. руб.}$$

Для ускоренных испытаний суммарные затраты на проведение одной серии испытаний составят:

$$Z'_{сум.уск} = 140\,000 + 15\,000 + 42\,000 \approx 0,197 \text{ млн. руб.}$$

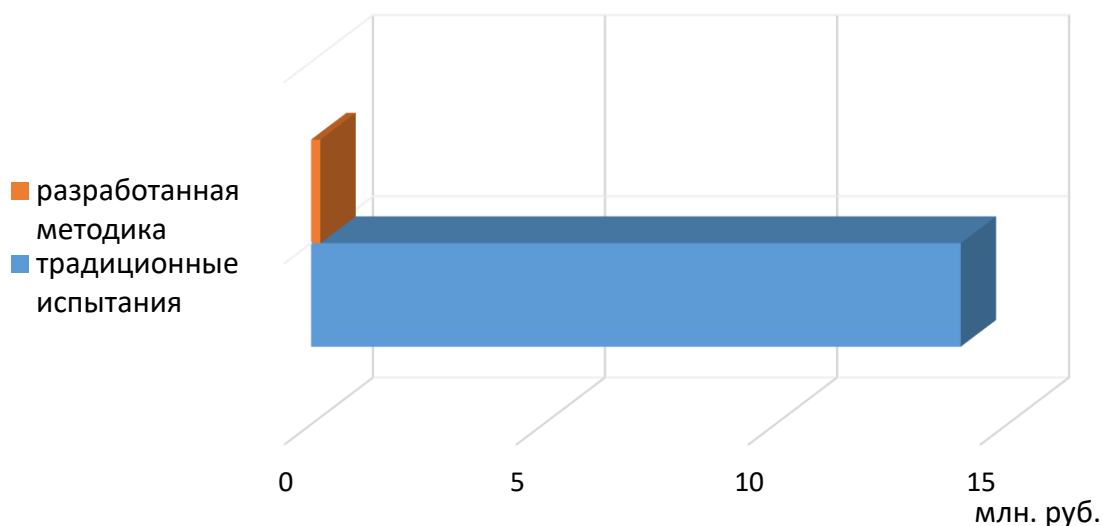


Рисунок 5.1 – Затраты на одну серию испытаний, млн. руб.

Коэффициент ускорения (по времени) $K_{\text{уск}}$ определяющий во сколько раз новая методика быстрее традиционной, определяется:

$$K_{\text{уск}} = \frac{T_{\text{тр}}}{T_{\text{уск}}}, \quad (5.5)$$

где $T_{\text{тр}}$ – длительность натурных эксплуатационных испытаний, ч.;
 $T_{\text{уск}}$ – длительность ускоренных испытаний, ч.

Таким образом, коэффициент ускорения (по времени) $K_{\text{уск}}$ составит:

$$K_{\text{уск}} = \frac{4320}{56} \approx 77.$$

Установлено, что разработанная методика позволяет получить ту же информацию о долговечности режущих элементов в 77 раз быстрее по сравнению с натурными эксплуатационными испытаниями.

Коэффициент снижения затрат на одну серию испытаний $K_{\text{затр.}}$ определяется:

$$K_{\text{уск}} = \frac{3'_{\text{сум.экспл.}}}{3'_{\text{сум.уск}}}. \quad (5.6)$$

$$K_{\text{уск}} = \frac{14}{0,197} \approx 71.$$

Следовательно, исследовать одну партию режущих элементов по новой разработанной методике стоит в 71 раза меньше по сравнению с натурными эксплуатационными испытаниями.

Экономия на одной серии $\mathcal{E}_1$ испытаний определяется:

$$\mathcal{E}_1 = C'_{\text{сум.экспл}} - C'_{\text{сум.уск}}. \quad (5.7)$$

$$\mathcal{E}_1 = 14 - 0,197 \approx 13,9 \text{ млн. руб.}$$

Годовая экономия для испытательного центра при 4 сериях в год составит:

$$\mathcal{E}_{\text{год.}} = \mathcal{E}_1 \cdot N. \quad (5.8)$$

$$\mathcal{E}_{\text{год.}} = 13,9 \cdot 4 \approx 55,4 \text{ млн. руб.}$$

Далее приведен расчет снижения эксплуатационных затрат хозяйства (на один смеситель-кормораздатчик).

Исходные данные для расчета эксплуатационных затрат типового хозяйства приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Исходные данные для расчета эксплуатационных затрат типового хозяйства

Показатель	Обозначение	Значение
Количество режущих элементов в одном смесителе кормораздатчике	пр.э.	200 шт.
Стоимость одного ножа с учетом доставки	$C_{\text{н. р.э.}}$	1250 руб.
Средний ресурс оригинального ножа	$T_{\text{н. р.э.}}$	1200 ч.
Годовая наработка смесителя	$T_{\text{год.}}$	2400 ч.
Стоимость часа простоя оборудования	$C_{\text{ч. пр.}}$	1500 руб./ч.
Время на замену ножей (200 шт.)	$t_{\text{зам}}$	2 ч.

На основе проведенных исследований, так как упроченный режущий элемент имеет ресурс на 80 % выше, чем не упроченный, следовательно средний его ресурс составит: $T_{\text{р.упр}} = 1200 \cdot 1,8 = 2160 \text{ ч.}$

При этом стоимость упроченного режущего элемента, за счет технологии упрочнения, в среднем возрастает на 15%, тогда стоимость упроченного ножа составит: $1250 \cdot 1,15 \approx 1500 \text{ руб.}$

Число замен режущих элементов в смесителе кормораздатчике в год, определяется:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{T_{\text{год}}}{T_{\text{н.р.э.}}(T_{\text{р.упр}})}, \quad (5.9)$$

где $T_{\text{год}}$ – годовая наработка смесителя-кормораздатчика, ч.; $T_{\text{н.р.э.}}$ – средний ресурс оригинального ножа, ч. $T_{\text{р.упр}}$ – ресурс упрочненного ножа, по результатам ускоренных испытаний, ч.

Следовательно, число замен в год для оригинальных (базовых) ножей составит:

$$Z_{\text{баз}} = \frac{2400}{1200} = 2.$$

Число замен в год для упрочненных ножей составит:

$$Z_{\text{упр}} = \frac{2400}{2160} \approx 1.$$

При этом, число замен в год могут быть скорректированы исходя из графика обслуживания смесителей-кормораздатчиков.

Затраты на приобретение режущих элементов за год:

$$З_{\text{н}} = Z_{\text{баз (упр)}} \cdot n_{\text{р.э.}} \cdot C_{\text{н.баз(упр)}}, \quad (5.10)$$

где $n_{\text{р.э.}}$ – количество режущих элементов в одном смесителе кормораздатчике, шт.
 $C_{\text{н.баз(упр)}}$ – стоимость одного режущего элемента с учетом доставки, соответственно оригинального и упрочненного режущего элемента, ч.

Затраты на приобретение оригинальных (базовых) режущих элементов в год составят:

$$З_{\text{н.баз}} = 2 \cdot 200 \cdot 1250 = 500\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на приобретение упрочненных режущих элементов в год составят:

$$З_{\text{н.упр}} = 1 \cdot 200 \cdot 1437,5 = 287\,500 \text{ руб.}$$

Затраты на простой техники при замене режущих элементов определяются:

$$З_{\text{пр.}} = Z_{\text{баз (упр)}} \cdot t_{\text{зам}} \cdot C_{\text{ч.пр.}} \quad (5.11)$$

Затраты на простои техники при замене оригинальных (базовых) режущих элементов составят:

$$З_{\text{пр.}} = 2 \cdot 2 \cdot 1500 = 6\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на простои техники при замене упрочненных режущих элементов составят:

$$З_{\text{упр.}} = 1 \cdot 2 \cdot 1500 = 3\,000 \text{ руб.}$$

Общие годовые эксплуатационные затраты определяются:

$$З_{\text{экспл.}} = З_{\text{н.баз (упр)}} + З_{\text{пр.баз (упр)}}. \quad (5.12)$$

Общие годовые эксплуатационные затраты для базового и упрочненного вариантов режущих элементов составят:

$$З_{\text{экспл.баз.}} = 500\,000 + 6\,000 = 506\,000 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{экспл.упр.}} = 287\,500 + 3\,000 = 290\,500 \text{ руб.}$$

Структура затрат на одну серию ускоренных испытаний представлена на рисунке 5.2.

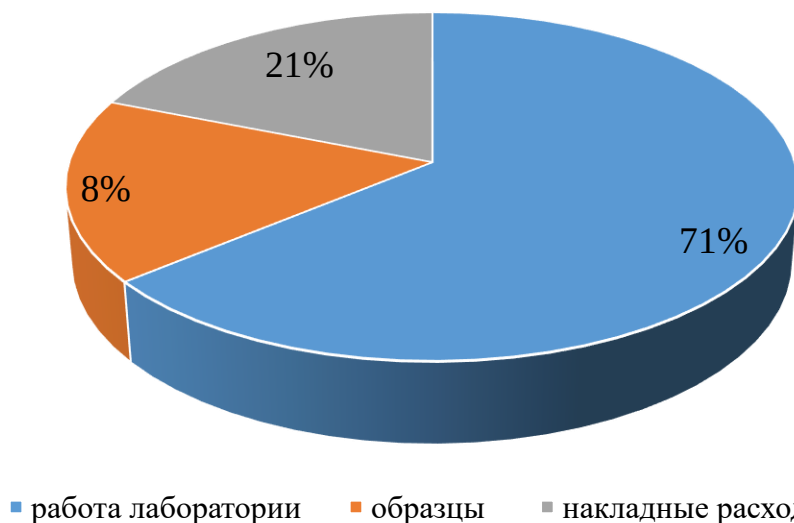


Рисунок 5.2 – Структура затрат ускоренных испытаний, %

Структура затрат ускоренных испытаний включает в себя: прямые затраты на работу лаборатории, состоящие из заработной платы оператора и инженера, амортизацию стендового оборудования, энергозатраты и расходные материалы);

накладные расходы (административные и коммунальные); стоимость испытываемых образцов.

Годовая экономия на один смеситель-кормораздатчик составит:

$$\Delta Z_{\text{см}} = Z_{\text{экспл.баз.}} - Z_{\text{экспл.упр.}} = 506\,000 - 290\,500 = 215\,500 \text{ руб.} \quad (5.13)$$

Общий годовой экономический эффект от разработанной методики определяется:

$$\mathcal{E} = (Z'_{\text{сум.экспл}} - Z'_{\text{сум.уск}}) \cdot N + \Delta Z_{\text{см}}. \quad (5.14)$$

Общий годовой экономический эффект от разработанной методики составит:

$$\mathcal{E} = (14 - 0,197) \cdot 4 + 0,215 \approx 55,4 \text{ млн. руб.}$$

Таким образом, годовая экономия от сокращения времени испытаний составит 55,4 млн. руб. Общий годовой экономический эффект от внедрения результатов работы 55,6 млн. руб.

5.2. Рекомендации производству

Разработанная методика ресурсных испытаний режущих элементов утверждена и внедрена в мае 2025 г. ФГБУ «Государственный испытательный центр» и ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (приложение В и приложение Г).

Она также может быть рекомендована для:

- испытательных центрах для сертификационных, приемочных и сравнительных испытаний режущих элементов, а также для оценки эффективности упрочняющих технологий;
- предприятий-изготовителей сельскохозяйственной техники и запасных частей – для входного контроля материалов, выборов рациональных способов упрочнения, подтверждения заявленного ресурса и оптимизации конструктивных параметров;

- научно-исследовательских организаций – для проведения экспериментальных исследований в области коррозионно-механического изнашивания и трибологии материалов.

При определении места расположения установки для ресурсных испытаний необходимо учитывать: безопасность и экологичность; логистику и технологический процесс; инженерное обеспечение; оптимальное зонирование.

Установку рекомендуется размещать в отделе технического контроля (ОТК) или в центральной лаборатории. Участок испытаний должен находиться по пути движения готовых деталей от производственного цеха до склада, что позволит проводить выборочный контроль партий, не создавая лишних перемещений.

При внедрении методики необходимо руководствоваться научным изданием методики [68], в котором отражены требования к безопасности и сущность методики.

Перспективным направлением совершенствование методики является создание интеллектуального исследовательского комплекса на базе технологий искусственного интеллекта включающий: 1. Систему машинного зрения, для автоматической оценки контролируемого процесса; 2. Адаптированный алгоритм управления режимов испытаний, оптимизирующий продолжительность экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая проведенные исследования, сформулированы основные выводы:

1. Установлено, что условия эксплуатации режущих элементов характеризуются комплексным коррозионно-механическим воздействием (абразив, кислоты, влажность). Существующие методы испытаний не позволяют моделировать эти условия и проводить ускоренную оценку долговечности, что обосновывает необходимость разработки новой методики.

2. Обоснован состав имитирующего субстрата, обеспечивающего коррозионно-механический характер изнашивания: древесные опилки (фракция 3-5 мм) – 25-40% объема; кварцевый песок (фракция 0,1-0,25 мм) – 10% объема смешиваемой смеси; органические кислоты (молочная 0,5-1%, уксусная 1-3%, масляная 0,1-0,5% от объема воды), влажность 50-90%, pH 4,0-5,5. Совместное воздействие факторов обеспечивает коэффициент ускорения $K_u = 3-5$ и сокращает время испытаний в 3-5 раз.

3. Получена математическая модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания, объединяющая теории механического изнашивания, коррозионной кинетики, резания сельскохозяйственных материалов и методологию ускоренных испытаний. Установлены критерии предельного состояния: толщина режущей кромки $2r_{кр} = 0,5$ мм; угол заточки $\beta_{кр} = 30^\circ$; износ по нормали $\Delta S_{кр} = 2$ мм; коррозионное поражение $G_{кр} = 15\%$; потеря массы Δm – 10% от исходной.

4. Разработана методика ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства, включающая программу и последовательность проведения экспериментов. Разработана установка для ресурсных испытаний (патент RU2842437), позволяющая проводить ускоренные испытания до 12 образцов одновременно. Обоснованы конструктивные параметры: количество режущих элементов – 12 (4 группы x 3 образца), угол установки ножей $\beta = 15^\circ$ с чередованием направлений $+15^\circ$ / -15° , обеспечивающий оптимальное соотношение резания и перемешивания субстрата. Прочностной анализ

подтвердил работоспособность вала ($\sigma_{max} = 90$ МПа); запас прочности сварного соединения $n_{CB} = 1,6$.

5. Экспериментально установлены кинетические зависимости изменения геометрических, массовых и коррозионных параметров изнашивания от наработки. Установлено, что CrN-покрытие обеспечивает: снижение скорости затупления режущей кромки в 1,38 раза; снижение скорости увеличения угла заточки в 2 раза; снижение скорости износа по нормали в 1,6 раза; снижение степени коррозионного поражения в 6,8 раза; снижение относительной потери массы в 2,52 раза. Прогнозируемый ресурс упрочненных образцов в эксплуатационных условиях составляет 162 ч., что в 1,32 раза выше, чем у неупрочненных режущих элементов.

6. Установлено, что методика позволяет сократить затраты на проведение ресурсных испытаний в 71 раз (с 14 млн. руб. до 197 тыс. руб. на одну серию). Годовая экономия от сокращения времени испытаний для испытательного центра составляет 55,4 млн. руб. (при 4 сериях в год). Применение результатов исследований для выбора оптимальных материалов и упрочняющих технологий позволяет снизить эксплуатационные затраты на 215 500 руб. в год на один смеситель-кормораздатчик. Общий годовой экономический эффект от внедрения результатов работы 55,65 млн. руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адигамов, К.А., Черкасов Р.И. Выбор рационального варианта установки ножей на машинах роторного типа для измельчения кормов // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2020. № 1(95). С. 24-28. DOI: 10.26897/1728-7936-2020-1-24-28.
2. Адлер, Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Алдошин, Н. В. Моделирование процессов утилизации техники в системе технического сервиса АПК: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Алдошин Николай Васильевич. – Москва, 2010. – 303 с. – EDN QFOLLN.
4. Аликаев, В.А., Петухова Е.А, Халенова А.Д. и др. Справочник по контролю кормления и содержания животных. М.: Колос, 1982. 320 с.
5. Андреев, С.А. Научно-методологические основы энергоресурсосбережения в технологических процессах АПК: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Андреев Сергей Андреевич, 2024. – 388 с. – EDN DKZCTL.
6. Аулов, В.Ф. Наплавка токами высокой частоты износостойких покрытий для упрочнения лап культиваторов / В.Ф. Аулов, А.В. Рыбалкин, А.В. Кирейнов // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2014. – С. 166–171.
7. Аулов, В.Ф. Перспективы упрочнения ножей измельчителей промышленных установок перерабатывающей отрасли / В.Ф. Аулов, Ю.Н. Рожков, В. П. Лялякин // Технический сервис машин. – 2021. – № 3(144). – С. 94-99.
8. Аюгин, Н.П. К определению угла заточки лезвий ножей измельчителей кормов, работающих в условиях абразивного изнашивания / Н.П. Аюгин, С.А. Яковлев, А.С. Кузин, И.А. Калашников // Агроинженерия. – 2026. – Т. 28, № 1. – С. 54-63. – DOI 10.26897/2687-1149-2026-1-54-63. – EDN CNIHLN.

9. Балабанов, В.И. Повышение долговечности двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники реализацией избирательного переноса при трении: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Балабанов Виктор Иванович. – Москва, 1999. – 512 с. – EDN NLPQGX.

10. Бернштейн, Д. Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга / Д. Б. Бернштейн // Тракторы и сельхозмашины. – 2002. – № 6. – С. 39–42. – URL: <http://www.avtomash.ru/gur/2002/200206.htm> (дата обращения: 06.11.2020).

11. Бойко, А.И. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания режущих элементов в растительных средах. Методические указания. МУ 105-0-068–83 / А.И. Бойко, П.И. Прокопцев, М.Н. Ерохин, Б.Д. Платонов // ВНИИживмаш – 1984 г. – 15 с.

12. Боярский, Л.Г. Приготовление и использование кормов в зимний период / Л.Г. Боярский, В.Л. Владимиров, В.В. Щеглов. - Москва: Агропромиздат, 1987. – 32.

13. Боярский, Л.Г. Технология кормов и полноценное кормление сельскохозяйственных животных: Учеб. пособие для студентов высш. и сред. учеб. заведений по специальности «Ветеринария», «Зоотехника», «Технология с.-х. производства» / Боярский Л.Г. - Ростов н/Д: Феникс, 2001. – 414.

14. Бугаев, А.В. Разработка технологии упрочнения режущих рабочих органов промышленных мясорубок. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2005. – 18 с.

15. Бурак, П.И. Результаты технической модернизации агропромышленного комплекса в Федеральных округах Российской Федерации в 2024 году / П. И. Бурак, И. Г. Голубев // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XVII Международной научно-практической интернет-конференции, Москва, 05 июня 2025 года. – Москва:

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2025. – С. 143-148. – EDN HUUNVU.

16. Бурченко, П.Н. Механико-технологическое обоснование параметров почвообрабатывающих машин нового поколения для работы в оптимальном диапазоне скоростей [текст]:/ П.Н. Бурченко// автореферат дисс. д.т.н., Москва, ВИМ, 1987. 30с.

17. Буряков, Н.П. Кормление высокопродуктивного молочного скота. М.: Проспект, 2009. 415 с. EDN: QLARWN

18. Винокуров, В.Н. Исследование изнашивания рабочих органов культиваторов и обоснование параметров, обеспечивающих их самозатачивание [текст]:/ В.Н.Винокуров// Научн. труды ГОСНИТИ, т.2, БТИ ГОСНИТИ, – М., 1963.-с.33-34.

19. Винокуров, В.Н. Определение выбраковочных параметров режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий [текст]:/ В.Н.Винокуров, А.К.Малов, В.В. Конаков// Тракторы и сельхозмашины. – 1976. – №10.-с.23-25.

20. Гаврилов, Д.В. Повышение долговечности деталей электромеханической обработкой / Д.В. Гаврилов, С.К. Федоров // МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 24–26 мая 2022 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. – С. 287-289. – EDN PBXSGJ.

21. Гайдар, С.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии и износа с применением нанотехнологий: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гайдар Сергей Михайлович. – Москва, 2011. – 433 с. – EDN QFKOIB.

22. Гайдар, С.М. Планирование и анализ эксперимента / С.М. Гайдар. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2015. – 548 с. – ISBN 978-5-7367-1112-3. – EDN UKBNAR.
23. Голубев, И.Г. Направления импортозамещения комплектующих и запасных частей сельскохозяйственной техники / И.Г. Голубев, В.Я. Гольдяпин // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 77-81. – EDN DIMGJS.
24. Голубев, И.Г. Опыт импортозамещения запасных частей зарубежной сельскохозяйственной техники / И.Г. Голубев, П.И. Носихин, А.Ю. Фадеев – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 32 с.
25. Горячкин, В.П. Собрание сочинений [текст]:/ В.П.Горячкин// Том1. – – М.: «Колос», 1965 – 720с.
26. Горячкин, В.П. Теория плуга: основания для систематического расчёта плугов / В. П. Горячкин. — Москва: Промиздат, 1927. — 198 с.
27. ГОСТ 1050-2013. «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия». М.: Стандартиформ, 2014. 32 с.
28. ГОСТ 13496.8-72. «Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений» [Текст]: Межгосударственный стандарт / Министерство заготовок СССР. — Москва: Стандартиформ, 2011. — 88 с.
29. ГОСТ 1778-2022. «Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений». - М.: Стандартиформ, 2023. – Дата введения 2023-06-01.
30. ГОСТ 23.205 - 79. Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима. – Введ. 1980-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1979. – 16 с.

31. ГОСТ 23.208-79. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 8 с.

32. ГОСТ 24026-80. «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения». — М.: Издательство стандартов, 1980. — 19 с.

33. ГОСТ 25.504-82. «Расчёты и испытания на прочность. Методы расчёта характеристик сопротивления усталости»: Межгосударственный стандарт: издание официальное / разработан Научно-исследовательским институтом машиностроения (НИИМАШ). - Введ. 1983–07–01. - Переизд. (с Изм. № 1) - М.: Стандартиформ, 2005. - 48 с.

34. ГОСТ 30479-97. «Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования» [Текст]: Межгосударственный стандарт / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Москва: ИПК Издательство стандартов, 1998. — 15 с.

35. ГОСТ 535-2005. «Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия». М.: Стандартиформ, 2007. 27 с.

36. ГОСТ 5950-2000. «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия». Утверждён и введён в действие Постановлением Госстандарта России от 23 августа 2000 г. №218-ст.

37. ГОСТ 9.039-74 «Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы» (СТ СЭВ 991-78, СТ СЭВ 5292-85, СТ СЭВ 6444-88).

38. ГОСТ 9.054-75 «Единая система защиты от коррозии и старения. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности».

39. ГОСТ 9.908-85. «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной

стойкости»: Межгосударственный стандарт: издание официальное / разработан Министерством чёрной металлургии СССР, Министерством химической промышленности СССР; утверждён и введён в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31 октября 1985 г. №3526. – Введ.1987–01–01. – Переизд. (с Изм. № 1) - М.: Стандартиформ, 2009. – 24 с.

40. ГОСТ 9.909-2023 Межгосударственный стандарт «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические, металлы и сплавы. Методы испытаний на климатических испытательных станциях» (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 сентября 2023 г. N 801-ст)

41. ГОСТ 9450-76. «Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников». - М.: Стандартиформ, 2023. - Дата введения 1977-01-01.

42. ГОСТ 9467-75. «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы»: Межгосударственный стандарт: издание официальное. – Введ. 1977–01–01. – Переизд. (с изм. №1) – М.: Стандартиформ, 2008. – 6 с.

43. ГОСТ ISO 9223-2017. Межгосударственный стандарт «Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка»

44. ГОСТ Р 27.102-2021 «Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения».

45. ГОСТ Р 54379-2011. «Крупка комбикормовая. Технические условия» [Текст]: национальный стандарт Российской Федерации / Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности» (ОАО «ВНИИКП»). — Москва: Стандартиформ, 2012. – 12 с.

46. Дворник, М.И. Исследование износостойкости режущих пластин, полученных из сплава Т5К10 с применением пресс-формы, изготовленной методом 3Д-печати из полилактида / М.И. Дворник, Е.А. Михайленко, А.А. Бурков, Е.В. Черняков // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: Материалы XXII Всероссийской научной конференции, Хабаровск,

30 сентября – 04 2024 года. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 156-159. – EDN WYCUTC.

47. Девянин, С. Н. Улучшение эксплуатационно-технических показателей быстроходного дизеля совершенствованием процесса впрыскивания и распыливания топлива : специальность 05.04.02 «Тепловые двигатели» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Девянин Сергей Николаевич. – Москва, 2005. – 390 с. – EDN NNPVBL.

48. Денисов, В.А. Восстановление базовых деталей дизельных двигателей с аварийными дефектами покрытиями на основе композиционных материалов : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Денисов Вячеслав Александрович, 2015. – 383 с. – EDN ASCDAPH.

49. Денисов, В.А. Повышение долговечности деталей экстерьера сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов / В.А. Денисов, В.Э. Славкина, Р.А. Алехина, Р.М. Касимов // Технический сервис машин. – 2023. – Т. 61, № 4(153). – С. 90-96. – DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-4-90-96. – EDN VHLKIM.

50. Дидманидзе, О. Н. Оптимизация по критериям ресурсосбережения состава и режимов работы средств для сбора, транспортировки и переработки чайного листа : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дидманидзе Отари Назирович. – Москва, 1995. – 301 с. – EDN LXLIYR.

51. Дидманидзе, О.Н. Методика оценки технического состояния ЦПГ автотракторных двигателей / О. Н. Дидманидзе, С. Н. Девянин, А. И. Сучков [и др.]. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Сам Полиграфист», 2023. – 83 с. – EDN JBCABE.

52. Дидманидзе, Р.Н., Алшабеби А. Х. Н. М., Майстренко Н.А. Методика расчета энергетической эффективности использования мобильных машинно-

тракторных агрегатов // Международный технический журнал. – 2025. – № 4(98). – С. 126-135. – DOI 10.34286/29449-4176-2025-98-4-126-135. – EDN GPXSAP.

53. Дородов, П.В. Пути повышения износостойкости поверхностей трения. В сборнике: Аграрная наука - сельскохозяйственному производству. материалы Международной научно-практической конференции: в 3 томах. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО Ижевская государственная сельскохозяйственная академия. 2019. С. 42-47.

54. Дородов, П.В., Петров В.А., Торопов Л.А. Регрессионная модель износа рабочей поверхности лопастей барабана дробилки зерна серии ДКР // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2024 № 3(79). С. 106-113. DOI: 10.48012/1817-5457-2024-3-106-113.

55. Дорохов, А. С. Колесные роботизированные технические средства: опыт и перспективы использования на животноводческих комплексах / А. С. Дорохов, Е. А. Никитин, Д. Ю. Павкин // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 4(298). – С. 16-21. – DOI 10.33267/2072-9642-2022-4-16-21. – EDN ANOGZC.

56. Дорохов, А. С. Повышение эффективности входного контроля качества запасных частей и сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дорохов Алексей Семенович. – Москва, 2012. – 423 с. – EDN QFMVJB.

57. Дорохов, А.С. Анализ роботизированных кормораздатчиков для животноводческих комплексов по содержанию крупного рогатого скота / А. С. Дорохов, В. В. Кирсанов, Д. Ю. Павкин [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2023. – Т. 70, № 1(50). – С. 94-104. – DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-1-94-104. – EDN FCJSIK.

58. Дорохов, А.С. Проблемы эффективного смешивания сочных и концентрированных компонентов кормосмеси для крупного рогатого скота в условиях современного животноводства / А.С. Дорохов, Е.А. Никитин, В.С. Семенюк // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 1(33). – С. 52-56. – EDN ZAIRBB.

59. Ермолов Л.С. Повышение надежности сельскохозяйственной техники [текст]:/ Л.С.Ермолов// – М.: Колос, 1979. 255с.

60. Ерохин, М. Н. Детали машин / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев. – Москва: ТРАНСЛОГ, 2018. – 410 с. – EDN YKZILJ.

61. Ерохин, М. Н. Повышение долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования для животноводства / М. Н. Ерохин, Д. М. Скороходов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XVII Международной научно-практической интернет-конференции, Москва, 05 июня 2025 года. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2025. – С. 236-241. – EDN KWQHCB.

62. Ерохин, М. Н. Принципы повышения надежности и эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / М. Н. Ерохин. – Москва, 1994. – 76 с. – EDN YNZLQR.

63. Ерохин, М.Н. Василий Прохорович Горячкин: Страницы жизни / М.Н. Ерохин, Н.Л. Зайцева, Н.В. Алдошин. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2020. – 280 с. – ISBN 978-5-7367-1578-7. – EDN VUTDSM.

64. Ерохин, М.Н. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде / М.Н. Ерохин, С. М. Гайдар, Д. М. Скороходов [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.

65. Ерохин, М.Н. Импортозамещение рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства / М.Н. Ерохин, Д.М. Скороходов, А.С. Павлов // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева:

Сборник статей, Москва, 05–07 июня 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – С. 557-561. – EDN DZZRWD.

66. Ерохин, М.Н. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М / М. Н. Ерохин, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба [и др.] // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 8. – С. 701-704. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704. – EDN BUMPSG.

67. Ерохин, М.Н. Развитие техники и рабочих органов для приготовления кормов в животноводстве / М.Н. Ерохин, Д.М. Скороходов, А. С. Павлов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2026. – Т. 20, № 1. – С. 72-80. – DOI 10.22314/2073-7599-2026-20-1-72-80. – EDN HAYETK.

68. Ерохин, М.Н., Казанцев, С.П., Скороходов, Д.М., Павлов, А.С., Чупятков Н.Н., Павлов А.С., Самуков Н.Н. Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства // Российский государственный аграрный университет, 2025. – 28 с. – ISBN 978-5-605-26352-4. – EDN TSOVRK.

69. Заплетников, И.Н. Экспериментальные исследования процесса резания растительных материалов / И.Н. Заплетников, А.В. Шеина, А.В. Гордиенко // Актуальные вопросы современной науки. – 2014. – № 33. – С. 52-61. – EDN SAAXAN.

70. Иванов, В.И., Аулов, В.Ф., Рожков, Ю.Н. Иванов, В. И. Эффективность эксплуатации ножей-измельчителей отечественного и импортного производства, используемых в сельскохозяйственных машинах / В. И. Иванов, В. Ф. Аулов, Ю. Н. Рожков // Технический сервис машин. – 2020. – № 2(139). – С. 149-154.

71. Игнаткин, И.Ю. Методы повышения стойкости метчиков / И. Ю. Игнаткин, С. К. Федоров, А. В. Щедрин [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 11(102). – С. 57-66. – EDN DTCADM.

72. Измайлов, А. Ю. Техническое обеспечение транспортной логистики в технологиях производства сельскохозяйственной продукции : специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» : диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук / Измайлов Андрей Юрьевич. – Москва, 2007. – 342 с. – EDN QDYHNLN.

73. Износ деталей сельскохозяйственных машин / Под ред. д-ра техн. наук проф. М.М. Севернева. — Ленинград : Колос. [Ленингр. отд-ние], 1972. — 288 с.

74. Ильюшин, А.А. Сопротивление материалов [Текст]: [Учеб. пособие для ун-тов] / А.А. Ильюшин, В.С. Ленский. - Москва: Физматгиз, 1959. - 371 с.

75. Ишков, А.В. Получение износостойких и защитных покрытий на рабочих поверхностях почвообрабатывающих органов сельхозтехники: современное состояние и перспективные направления исследований / А.В. Ишков, В.В. Иванайский, Н.Т. Кривочуров, и др. // Научные исследования: информация, анализ, прогноз. -Колл. монография. -Гл. LVIII. -Воронеж: Издво ВГПУ, 2011. -С. 185-205.

76. Ишуткин, В.И.. Настройка металлорежущих станков [Текст]. - Москва ; Свердловск : Машгиз. [Урал-Сиб. отд-ние], 1960. - 103 с.

77. Казанцев, С.П. Восстановление деталей комбинированными диффузионными покрытиями / С. П. Казанцев // Техника и оборудование для села. – 2004. – № 3. – С. 15. – EDN ZFDJXJ.

78. Казанцев, С.П. Разработка комбинированной технологии получения железоборидных покрытий при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Казанцев Сергей Павлович. – Москва, 2006. – 301 с. – EDN NOANMR.

79. Калашников, А.П. О нормах и рационах кормления сельскохозяйственных животных / А. П. Калашников // Зоотехния. – 2007. – № 5. – С. 7-10. – EDN JWWKFV.

80. Кирсанов, В.В. Методика оптимизации параметров машинного кормления крупного рогатого скота / В.В. Кирсанов, Д.Ю. Павкин, Е.А. Никитин, И.М. Довлатов // Агроинженерия. – 2021. – № 1(101). – С. 10-14. – DOI 10.26897/2687-1149-2021-1-10-14. – EDN VISCRV.

81. Кондратюков, С. В. Основы расчета экономической эффективности внедрения новой техники / С. В. Кондратюков, Е. С. Стаурский // Омский научный вестник. – 2014. – № 2(126). – С. 59-61. – EDN SEICED.

82. Кормление животных: Учебник / Под ред. И.Д. Драганова, Н.Т. Макарецва, В.В. Калашникова. М.: РГАУ-МСХА им. Тимирязева, 2010. Т. 1. 341 с. Т. 2. 565 с.

83. Крагельский, И. В. Трение и износ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 479 с.

84. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. - Москва: Машиностроение, 1977. - 526 с.: ил.; 21 см.

85. Крагельский, И.В., Непомнящий Е.Ф., Харач Г.М. Усталостный механизм и краткая методика аналитической оценки величины износа поверхностей трения при скольжении (исходя из свойств материалов и условий их работы) / АН СССР. Науч. совет по трению и смазкам. Гос. науч.-исслед. ин-т машиноведения. - Москва: Б. и., 1967. - 19 с.

86. Курчаткин, В.В. Надежность и ремонт машин. Учебник для студентов вузов по агроинженерным специальностям [текст]:/ В.В.Курчаткин, Н.Ф.Тельнов, К.А.Ачкасов, В.И.Савченко, В.Н.Бугаев, А.Н.Батищев, Б.А.Богачев, Н.А.Очковский, С.С.Некрасов, Ю.В.Мазаев, В.С.Новиков, Е.И.Базаров, М.И.Юдин, А.Г.Левшин, Н.В.Катаргин, Г.П.Копчиков, В.И.Осинов// – М.: Колос, 2000. 775с.

87. Левшин, А.Г. Разработка методов повышения эффективности использования мобильных сельскохозяйственных агрегатов как человеко-машинных систем: специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Левшин Александр Григорьевич. – Москва, 2000. – 323 с. – EDN NLTS DP.

88. Лискин, И.В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворежущих

рабочих органов / И.В. Лискин, А.В. Миронова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2020. – Т. 14, № 3. – С. 53-58. – DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58. – EDN PMAMCF.

89. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. - Москва: Машиностроение, 1982. - 320 с.

90. Лялякин, В.П. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники / В.П. Лялякин, И.Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2016. – № 4. – С. 41–43.

91. Макаров, А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов [Текст]. - Москва: Машиностроение, 1966. - 264 с.

92. Морозов, Н.М. Система машин для механизации и автоматизации выполнения процессов при производстве продукции животноводства и птицеводства на период до 2030 года: монография / Н.М. Морозов и др. – М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2021. – 180 с.

93. Никитин, Е.А. Анализ проблем эффективного приготовления кормовой смеси в современном животноводстве / Е.А. Никитин, В.С. Семенюк // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 2(34). – С. 158-163. – EDN KJPYIL.

94. Новиков, В.С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. – 38 с.

95. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных / А.П. Калашников, В.И. Фисинин, В.В. Щеглов [и др.]. – 3-е издание переработанное и дополненное. – Москва: Издательство «Знание», 2003. – 456 с. – ISBN 5-94587-093-5. – EDN PXQMHL.

96. Патент № 2613292 С Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Круговой почвенный стенд: № 2015154117: заявл. 17.12.2015: опубл. 15.03.2017 / С.А. Сидоров, Д.А. Миронов, И.В. Лискин; заявитель Федеральное

государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). – EDN ICJPAF.

97. Патент на изобретение № 2842437 С1. Установка для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов оборудования для животноводства, Российская Федерация, МПК G01N 3/56. / Д.М. Скороходов, А.С. Павлов, М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чупятов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – № 2024127687: заявл. 19.09.2024: опубл. 26.06.2025. Бюл. № 18. – 7 с.

98. Патент на полезную модель № 176679 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Установка для исследования на абразивный износ рабочих органов молотильного аппарата зерноуборочных комбайнов: № 2017127565: заявл. 01.08.2017: опубл. 25.01.2018 / В.А. Шахов, В.С. Коляда, И.М. Затин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный аграрный университет». – EDN RBWKUR.

99. Петров, В.А. Влияние износа рабочих органов молотковой дробилки на показатели технологического процесса / В. А. Петров, С. В. Волков, П. Э. Павлов // Вклад молодых ученых в реализацию приоритетных направлений развития аграрной науки : материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых, Ижевск, 17–19 ноября 2021 года. – Ижевск: Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, 2021. – С. 280-284. – EDN ZQBKTB.

100. Петров, В. А. Повышение надежности дробилки зерна путем оптимизации конструкции лопастного колеса барабана: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петров Виталий Анатольевич, 2023. – 182 с. – EDN TIGXIO.

101. Прокопцев, В.И. Предпосылки повышения ресурса плужных лемехов [текст]: / В.И. Прокопцев // «Тракторы и сельскохозяйственные машины». – 1998, – №10-с.24-26.
102. Пряхин, В.Н., Карапетян М.А., Андреев В.Д. Методы, модели и средства математического моделирования технологических процессов // Международный технический журнал. – 2023. – № 1(87). – С. 36-45. – DOI 10.34286/2949-4176-2023-87-1-36-45. – EDN VGCHJM.
103. Радченко, В.Г. Основы питания и кормления сельскохозяйственных животных. СПб.: Лань, 2015. 640 с.
104. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. М., «Машиностроение», 1975. – 311 с.
105. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов [Текст] / Н.Е. Резник, д-р техн. наук, проф. - Москва: Машиностроение, 1975. - 311 с.: ил.; 22 см.
106. Решетов, Д.Н. Надежность машин: [Учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов] / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев; Под ред. Д. Н. Решетова. - Москва: Высш. шк., 1988. - 237,[1] с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-06-001200-X : 55 к.
107. Решиков, В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач [Текст] / В.Ф. Решиков. – : Машиностроение, 1975. – 232 с.
108. Рыбалкин, Д.А. Теоретические предпосылки оценки качества кормовой смеси / Д.А. Рыбалкин, Е.Л. Чепурина, А.С. Свиридов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2023. – № 4. – С. 162-165. – DOI 10.24412/2311-6447-2023-4-162-165. – EDN MHTFBJ.
109. Рыбалкин, Д.А. Факторы, влияющие на качественные показатели при мелком измельчении сочных кормов / Д.А. Рыбалкин, Е.С. Шнарас, И.А. Башмаков // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2023. – № 4. – С. 251-254. – DOI 10.24412/2311-6447-2023-4-251-254. – EDN NRWLVB.

110. Севернев, М.М. Долговечность и работоспособность сельскохозяйственных машин/ М.М. Севернев // «Вопросы земледельческой механики», Т.Х. – Минск. Сельхозиз БССР, 1963. – С. 243-261

111. Серов, А.В. Многофункциональные покрытия / А. В. Серов, П. И. Бурак // Доклады ТСХА, Москва, 02–04 декабря 2020 года. Том ВЫПУСК 293 Часть III. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2021. – С. 534-536. – EDN EYTJKD.

112. Серов, А.В. Совершенствование технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой металлической ленты: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Серов Антон Вячеславович. – Москва, 2011. – 209 с. – EDN QFPHSD.

113. Серов, Н.В. Функциональные покрытия как средство повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин / Н. В. Серов, О. М. Мельников, А. В. Серов // Наука молодых - будущее России : сборник научных статей 9-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 237-240. – EDN RWFWRU.

114. Серов, Н.В. Упрочнение плоских рабочих органов сельскохозяйственной техники электроконтактной пайкой металлической ленты: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. М.: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2017. – 16 с.

115. Сидоров, С.А. Комбинированные лабораторные исследования материалов рабочих органов на абразивный износ / С.А. Сидоров, С.Н. Поткин, Д.А. Миронов, И.В. Лискин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 6. – С. 21-26. – DOI 10.22314/207375992016.6.2126. – EDN XGVRHF.

116. Скороходов Д.М., Павлов А.С. Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве // Сельскохозяйственные машины и

технологии. 2025. Т. 19. №4. С. 91-97. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97.EDN: AYYRVH.

117. Скороходов, Д. М. Совершенствование методов и средств контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скороходов Дмитрий Михайлович. – Москва, 2017. – 178 с. – EDN ВКРХУК.

118. Скороходов, Д. М. Формирование модели технического процесса упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства / Д. М. Скороходов // Технический сервис машин. – 2025. – Т. 63, № 3. – С. 60-66. – DOI 10.22314/2618-8287-2025-63-3-60-66. – EDN RUIQSE.

119. Скороходов, Д.М. Анализ современных смесителей-кормораздатчиков и их рабочих органов / Д.М. Скороходов, Н.Н. Чупятов, А.С. Павлов // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов : Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 265-269. – EDN AMXPDR.

120. Скороходов, Д.М. Методика оценки долговечности режущих элементов машин и оборудования для животноводства / Д.М. Скороходов, А.С. Павлов // Международных технический журнал, 2026. № 1 (101). С. 66–77. DOI 10.34286/2949-4176-2026-101-1-66-77.

121. Скороходов, Д.М. Разработка методики ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства / Д.М. Скороходов, А.С. Павлов // Международная научная

конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию Тимирязевской академии: Сборник статей, Москва, 02–04 июня 2025 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2025. – С. 423-426. – EDN JFDFGP.

122. Скороходов, Д.М. Физико-механические свойства сталей, применяемых при изготовлении рабочих органов кормоприготовительных машин для животноводства / Д.М. Скороходов, Н.Н. Чупятов, А.С. Павлов // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича: Сборник статей, Москва, 03–05 июня 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. – С. 614-617. – EDN BCLWAR.

123. Сленко, Д.Б. Совершенствование технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин / Д.Б. Сленко, А.С. Дорохов, В.А. Денисов, Д.А. Добрин // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2018. – № 8. – С. 26-31. – EDN YAQTCH.

124. Соловьев, С.А. и др. Износостойкие композиционные покрытия для рабочих органов сельхозмашин / С.А. Соловьев, В.В. Иванайский, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, В.П. Лялякин, В.Ф. Аулов. – М.: ФГБУН РАН, 2019. – 188 с.

125. Сорокин, Г.М., Ефремов А.П., Саакян Л.С. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов. Учебное пособие. - М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 424 с. ISBN 5-7246-0165-6.

126. Состояние и перспективы развития технологий повышения износостойкости и долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин. Отчет о НИР. Номер гос. рег. 122110100038-7. Отв. испол. Голубев И.Г. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2022. – 245 с.

127. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*: свод правил : издание официальное. – Введ. 2017–08–28. – С изм. № 6 (введ. 2025–01–10). – М.: Минстрой России, 2017. – 175 с.

128. Спирин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся

по программам бакалавриата 22.03.02 и магистратуры 22.04.02 направления «Металлургия» / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин [и др.]; Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Издание 2-е переработанное и дополненное. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с. – ISBN 978-5-9904848-4-9. – EDN WCTGGT.

129. Тененбаум, М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию [текст]: / М.М.Тененбаум// – М.: Машиностроение, 1978, 271с.

130. Трухачев, В.И. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О.Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. – Москва: ООО «Мегаполис», 2022. – 413 с. – ISBN 978-5-6049928-2-1. – EDN RSFSFK.

131. Федоров, С.К. Повышение износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой / С. К. Федоров, Ю. С. Иванова, М. В. Власов, М.А. Лашуков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2019. – № 2(90). – С. 40-44. – EDN ZDPQVV.

132. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. - 16-е изд., испр. - Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. - 543 с.

133. Хазиахметов, Ф.С. Рациональное кормление животных. СПб. Лань, 2011. 359 с. EDN: QLCFGT

134. Хохрин, С.Н. Корма и кормление животных / С. Н. Хохрин. – Издание 2-е дополненное и переработанное. – Санкт-Петербург : Проспект Науки, 2018. – 502 с. – ISBN 978-5-906109-74-3. – EDN YQGPNL.

135. Хохрин, С.Н. Кормление крупного рогатого скота, овец, коз и лошадей / С.Н. Хохрин. – Издание второе, дополненное и переработанное. – Санкт-Петербург: КВАДРО, 2019. – 486 с. – ISBN 978-5-906371-36-2. – EDN ZBINVU.

136. Хохрин, С.Н. Кормление сельскохозяйственных животных. Учебник. М.: КолоС, 2004. 688 с. EDN: QKWJTX

137. Хохрин, С.Н. Кормопроизводство и кормление сельскохозяйственных животных: Учебник для СПО / С.Н. Хохрин, Ю.П. Савенко. – 2-е издание,

стереотипное. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 300 с. – ISBN 978-5-8114-9178-0. – EDN ZBBQHF.

138. Хохрин, С.Н. Практикум по составлению рационов для животных / С.Н. Хохрин. – Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Перспективна Наука», 2022. – 381 с. – ISBN 978-5-6046442-9-4. – EDN FUWWNE.

139. Хрущев, М.М. Абразивное изнашивание [текст]:/ М.М.Хрущев// – М.: «Наука», 1970. 252с.

140. Ценч, Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей. Технический сервис машин. 2025. Т. 63. N 1. С. 102-110. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.

141. Черноиванов, В.И., Лялякин, В.П., Голубев, И.Г. Инновационные проекты и разработки в области технического сервиса. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 96 с.

142. Черноиванов, В.И., Лялякин, В.П., Голубев, И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 586 с.

143. Шаров, В.В. Аспекты наследия академика В.П. Горячкина / В.В. Шаров // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 65-71. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-65-71. – EDN DJSIWZ.

144. Шевеля, В.В. Трибохимия и реология износостойкости: [Монография] / В.В. Шевеля. В.П. Олександренко. - Хмельницкий: ХНУ, 2006. -278 с.

145. Шпилько, Ю.А. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [текст]:/ Ю.А. Шпилько, В.И. Драгайцев, П.Ф. Тулапин // – М.: Аграрная наука, 1998. 320с.

146. Щеглов, В.В., Боярский, Л.Г. Корма: приготовление, хранение, использование: Справочник. – М.: Агропромиздат, 1990. — 255 с.

147. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: [учеб. для вузов по спец. 12.01 «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты»] / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. - Минск: Вышэйш. шк., 1990. – 510 с.

148. Archard, J. F. "Contact and Rubbing of Flat Surfaces." *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 8, Aug. 1953, pp. 981–88.

149. Archard, J. F., Hirst, W. *The Wear of Metals under Unlubricated Conditions* // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.* – 1956. – Vol. 236, No. 1206. – P. 397–410.

150. Attia, A.A., Salih, S.A., Baraka, A.M.. (2002). Corrosion and passivation behaviors of some stainless steel alloys in molten alkali carbonates // *Electrochimica Acta.* – 2002. – Vol. 48, No. 2. – P. 113–118.

151. Avdeev, Ya. G. Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1 / Ya. G. Avdeev, Yu. I. Kuznetsov // *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition.* – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 394–426. – DOI 10.17675/2305-6894-2020-9-2-2. – EDN CKAJVL.

152. Babajanyan A., Pakhomov V., Rudoy D., Braginets S., Maltseva T. The results of the study of the amino acid composition of compound feeds during the extrusion of wheat grain with the addition of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens* L.). E3S Web of Conferences: International Scientific Conference «Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East» (AFE-2022). 2023;371:01074. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337101074>

153. CATRA. Testing Equipment: Knife Edges, SAET [Электронный ресурс]. URL: <https://www.catra.org/testing-equipment/knife-edges/saet/> (дата обращения: 28.04.2026)

154. Dicello P.T., Kulasekere R., Daly R. E. An apparatus for measuring abrasability of a Sample: Patent US 6,412,330 B1. – 2001. – 12 p.

155. Khadom, Anees. Mathematical and quantum chemical studies for the corrosion inhibition of steel in hcl acid. *Diyala Journal of Engineering Sciences.* 3. 106–121. 10.24237/djes.2010.03108.

156. McDonald P., Henderson A.R., Heron S.J.E. *The Biochemistry of Silage.* – 2nd ed. – Marlow: Chalcombe Publications, 1991. – 340 p.

157. Messinese E., Ormellese M., Brenna A. A predictive model for corrosion of carbon steel exposed to organic acids: Theory and validation in formic, azelaic and citric

acid // Corrosion Science. – 2024. – Vol. 235. – P. 112160. – DOI: 10.1016/j.corsci.2024.112160.

158. Messinese, Elena & Ormellese, Marco & Brenna, Andrea. (2022). Tafel-Piontelli model for the prediction of uniform corrosion rate of active metals in strongly acidic environments. *Electrochimica Acta*. 426. 140804. 10.1016/j.electacta.2022.140804.

159. Messinese, Elena & Ormellese, Marco & Brenna, Andrea. (2024). Advancing a Comprehensive Model for Carbon Steel Corrosion in Weak Acids: Validation Using Valeric and Acetic Acids. *Applied Sciences*. 14. 11341. 10.3390/app142311341.

160. Reaction Kinetics of the Synthesis of Methyl Chloroacetate from Chloroacetic Acid and Methanol Muqian He, Zhengdong Xu, Xiaoping Wang, and Dianhua Liu *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2024 63 (6), 2676-2684 DOI: 10.1021/acs.iecr.3c03807.

161. Romek D., Ulbrich D., Selech J., et al. Evaluation of wear of machine parts made of Armox 600, Ramor 500 and S355 steel with the use of the rotating bowl unit // *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. – 2017. – Vol. 62, No. 2. – P. 93–95.

162. Webster J. *The Biochemistry of Silage* (Second Edition). By P. McDonald, A. R. Henderson and S. J. E. Heron. Marlow, Bucks, UK: Chalcombe Publications, (1991), pp. 340, , ISBN 0-948617-225. *Experimental Agriculture*. 1992;28(1):125-125. doi:10.1017/S0014479700023115.

163. Weissbach F., Haacker K. On the causes of butyric acid fermentation in silages from whole crop cereals // *Wirtschaftseigene Futter*. — 1988. — Vol. 34, № 2. — P. 88–99.

164. 副島啓義. 摩擦摩耗試験装置: 特許 JP 5655531 B2. – 2014. – 15 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2842437

Установка для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов оборудования для животноводства

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Скороходов Дмитрий Михайлович (RU), Павлов Александр Сергеевич (RU), Ерохин Михаил Никитьевич (RU), Казанцев Сергей Павлович (RU), Чунятов Николай Николаевич (RU)*

Заявка № **2024127687**

Приоритет изобретения **19 сентября 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **26 июня 2025 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **19 сентября 2044 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0692e7c1a6300b154f2401670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU⁽¹¹⁾ **2 842 437** ⁽¹³⁾ C1

(51) МПК
G01N 3/56 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 27.06.2025)
Пошлина: учтена за 5 год с 20.09.2028 по 19.09.2029. Установленный срок для уплаты пошлины за 6 год: с 20.09.2028 по 19.09.2029. При уплате пошлины за 6 год в дополнительный 6-месячный срок с 20.09.2029 по 19.03.2030 размер пошлины увеличивается на 50%.

(52) СПК
G01N 3/565 (2024.08)

(21)(22) Заявка: **2024127687**, 19.09.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.09.2024

Дата регистрации:
26.06.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **19.09.2024**

(45) Опубликовано: **26.06.2025** Бюл. № **18**

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2736702 C1, 19.11.2020. RU
2785100 C1, 02.12.2022. RU 2408865 C1,
10.01.2011. RU 2410668 C1, 27.01.2011. US
6412330 B1, 02.07.2002.

Адрес для переписки:
**127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49,
РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева,
Управление научной и инновационной
деятельности**

(72) Автор(ы):

**Скороходов Дмитрий Михайлович (RU),
Павлов Александр Сергеевич (RU),
Ерохин Михаил Никитьевич (RU),
Казанцев Сергей Павлович (RU),
Чупятов Николай Николаевич (RU)**

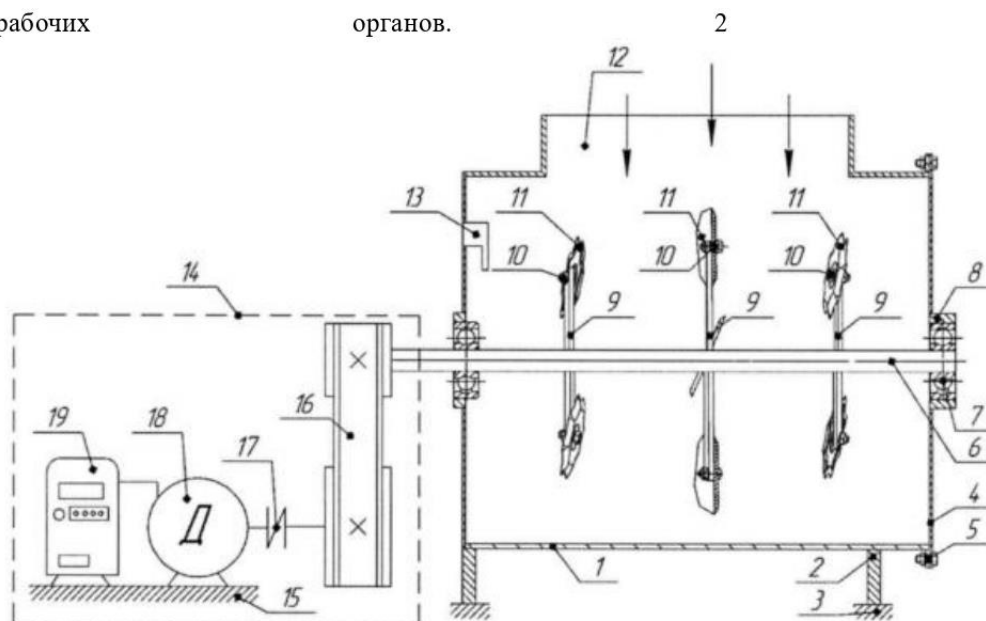
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Российский
государственный аграрный университет -
МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ
ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)
(RU)**

(54) Установка для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих
органов оборудования для животноводства

(57) Реферат:

Установка для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов оборудования для животноводства относится к сельскохозяйственному машиностроению. Сущность предлагаемого изобретения заключается в том, что в устройстве, включающем корпус, смонтированный на стойках, с загрузочным окном и валом, установленным с возможностью вращения, приводной механизм, корпус установки оснащен крышкой, закрепленной на корпусе посредством болтового соединения, обеспечивающего монтаж и демонтаж вращающегося вала, при этом на вращающемся вале под углом 90° жестко смонтированы пластины, обеспечивающие крепление испытываемых рабочих органов, кроме того, для контроля влажности при проведении исследований корпус установки снабжен датчиком влажности. Техническим результатом изобретения является повышение точности определения износостойкости и коррозионной стойкости



Фиг. 1

Изобретение относится к сельскохозяйственному машиностроению, в частности к лабораторным установкам для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства, и может быть использовано как в научно-исследовательских институтах, так и на предприятиях по изготовлению рабочих органов сельскохозяйственной техники для животноводства.

Известна установка для исследования износостойкости рабочих органов режущих аппаратов уборочных сельскохозяйственных машин (патент RU 129332 U1), техническим результатом которого является исследование износостойкости рабочих органов режущих аппаратов уборочных машин различной конструкции и типов в одинаковых условиях, а также обеспечение постоянного заглубления рабочих органов в абразив. Состоит из платформы для крепления червячного редуктора и электродвигателя, механизма вращения и механизма фиксации рабочих органов, клиноременной передачи, кронштейна, внутренней и наружной колбы, зажимного винта, открывающегося люка, задвигающейся крышки. Основным недостатком данного устройства является отсутствие возможности исследования на износостойкость и коррозионную стойкость рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства.

Также существуют другие способы и установки для испытаний режущих элементов на абразивный износ (Патенты: RU 2736702 C1, RU 2785100 C1, RU 2408865 C1, RU 2410668 C1). Их недостатком является ограниченность их технологической применимости, они предназначены для испытаний рабочих органов только почвообрабатывающих машин и не позволяют имитировать условия работы деталей режущих элементов сельскохозяйственных машин в животноводстве.

Наиболее близким к изобретению по совокупности существующих признаков относится метод испытания режущих элементов в растительных средах (МУ 105-0-068-83, УДК 631.363.2.02.001.4, Письмом Министерства машиностроения для животноводства и кормопроизводства от 29 декабря 1983 г. №АМ-02/467, срок внедрения установлен с 01.07.84), предназначенный для испытаний режущих элементов рабочих органов машин для заготовки и измельчения кормов в условиях изнашивания лезвий растительной массы. Сущность метода состоит в определении степени изнашивания лезвий растительной средой при осуществлении процесса резания в установленных режимах испытаний посредством измерений геометрических параметров лезвий методом снятия оттисков профиля с контролируемых участков и последующим увеличением изображения оптическими приборами. Устанавливаются два метода испытаний: метод А - испытания в условиях эксплуатации машин с использованием в качестве образцов лезвий режущих элементов рабочих органов; метод Б - сравнительные ускоренные стендовые

испытания при воспроизведении процесса резания растительной массы в определенных режимах испытаний и использовании специальных образцов лезвий. Метод применяется для общей сравнительной оценки износостойкости и самозатачиваемости лезвий безотносительно к конструкции режущего рабочего органа. Метод Б включает в себя стендовую установку для ускоренных испытаний образцов лезвий, состоящую из: образца лезвия, противорежущей пластины, планшайбы крепления образцов лезвий, винтового конвейера-питателя, выгрузного отверстия, редуктора привода винтового конвейера-питателя, кормопровода, загрузочного бункера, редуктора привода планшайбы, электродвигателя привода планшайбы, электродвигателя привода винтового конвейера. Основными недостатками этой стендовой установки является: 1 - отсутствие возможности испытаний одновременно трех и более образцов, что увеличивает время проведения ускоренных испытаний нескольких образцов изготовленных из разных материалов и упроченных различными методами; 2 - отсутствие контроля уровня влажности, что является важным параметром для исследования при ускоренных испытаниях рабочих органов в растительных средах; 3 - сложность конструкции стендовой установки, что увеличивает стоимость ее изготовления.

Анализ известных технических решений показал, что технической проблемой в данной области является необходимость расширения возможности проведения лабораторных исследований одновременно нескольких рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства, различной конструкции и типов, на износостойкость и коррозионную стойкость в одинаковых, приближенных к реальным, условиях с возможностью контроля влажности.

Техническим результатом изобретения является увеличение производительности установки.

Для решения указанной технической проблемы и достижения заявленного технического результата в установке для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов сельскохозяйственных машин для животноводства, включающей корпус, смонтированный на стойках, с загрузочным окном и валом установленным с возможностью вращения, приводной механизм, при этом корпус установки оснащен крышкой, закрепленной на корпусе посредством болтового соединения, обеспечивающего монтаж и демонтаж вращающегося вала, при этом на вращающемся вале под углом 90° жестко смонтированы пластины, обеспечивающие крепление испытуемых рабочих органов, кроме того, для контроля влажности при проведении исследований корпус установки снабжен датчиком влажности.

Техническое решение обеспечит ресурсные испытания на износостойкость и коррозионную стойкость в условиях, приближенных к реальным, в одинаковых условиях одновременно двенадцати рабочих органов.

Предложенное техническое решение проиллюстрировано на фигурах.

На фиг.1 представлена схема установки;

на фиг.2 - вид крепления испытуемых рабочих органов к пластинам, установленным на вращающемся валу.

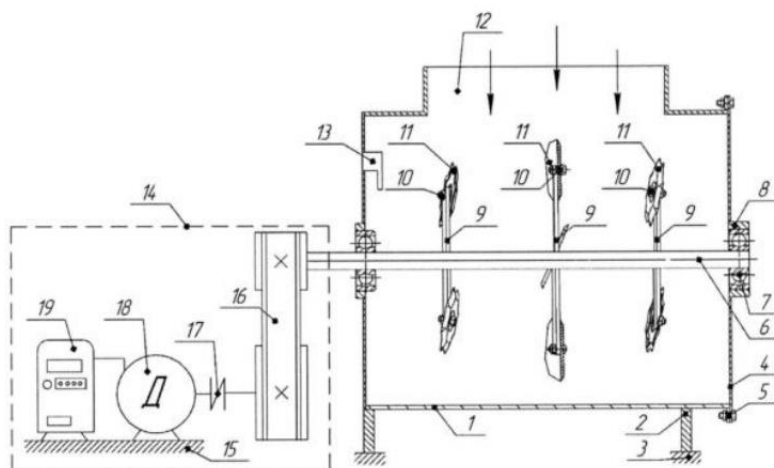
Установка состоит из корпуса 1, смонтированного на стойках 2, установленных на опоре 3, корпус 1 оснащен крышкой 4, закрепленной при помощи болтового соединения 5, обеспечивающей монтаж и демонтаж вращающегося вала 6, закрепляемого в подшипниках 7, устанавливаемых во втулках 8. На вращающемся валу 6 под углом 90° к друг другу жестко смонтированы пластины 9, к их краям при помощи болтового соединения 10 закреплены испытуемые рабочие органы 11. Корпус имеет загрузочное окно 12, датчик влажности 13, приводной механизм 14, установленный на опоре 15 и включающий в себя ременную передачу 16, кулачково-дисковую муфту 17, электродвигатель 18 и частотный преобразователь 19.

Установка работает по следующему алгоритму: Испытуемые рабочие органы 11 при помощи болтового соединения 10 неподвижно закрепляются на пластинах 9. Включают приводной механизм установки 14, и испытуемые рабочие органы 11 начинают вращение. Через загрузочное окно 12 загружается абразив с жидкими кормовыми добавками, что позволяет обеспечить приближенные условия испытаний к реальным. Регулировка частоты вращения электродвигателя 18 осуществляется частотным преобразователем 19. Испытуемые рабочие органы 11 прореживают абразив с жидкими кормовыми добавками, тем самым происходит их изнашивание. Для контроля уровня влажности в корпус установки 1 встроен датчик влажности 13. Смена абразива происходит через загрузочное окно 12.

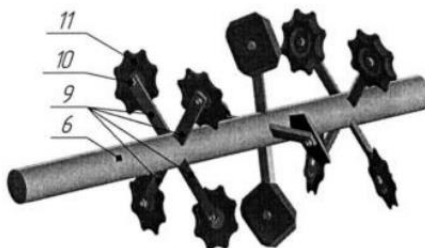
Установка для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов оборудования для животноводства по сравнению с прототипом обеспечивает возможность одновременно проводить ресурсные испытания двенадцати рабочих органов в одинаковых условиях при одной влажности, контролируемой датчиком влажности, обеспечивая точность полученных данных.

Формула изобретения

Установка для ресурсных испытаний на абразивный и коррозионный износ рабочих органов оборудования для животноводства, включающая корпус, смонтированный на стойках, с загрузочным окном и валом, закрепляемым в подшипниках, устанавливаемых во втулках, приводной механизм, отличающаяся тем, что приводной механизм дополнительно оснащён частотным преобразователем для регулировки частоты вращения электродвигателя, корпус установки оснащён крышкой, закреплённой на корпусе посредством болтового соединения, обеспечивающего монтаж и демонтаж вращающегося вала, при этом на вращающемся вале под углом 90° жестко смонтированы пластины, обеспечивающие крепление испытуемых рабочих органов, кроме того, для контроля влажности при проведении исследований корпус установки снабжён датчиком влажности.



Фиг. 1



Фиг. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты исследований

Результаты измерения микротвердости

Сталь-9ХС
Покрытие - CrN

ГОСТ 9450-79 «Метод восстановленного отпечатка»

Дорожка 1.

Нагрузка 50гр.(0,5Н)

Кол-во отпечатков: 60 шт.

Таблица 1 приложения Б. Результаты промеров микротвердости

№	Дсред, мкм	Дмакс, мкм	Дмин, мкм	HV
1	20,7	21,4	20,0	215,7
2	22,0	22,9	21,0	192,0
3	12,5	12,9	12,2	589,3
4	13,0	13,4	12,7	545,8
5	12,7	12,9	12,5	574,7
6	12,4	12,8	12,0	602,1
7	13,6	14,0	13,1	504,3
8	14,3	14,5	14,2	451,4
9	13,7	13,8	13,5	496,6
10	15,2	15,2	15,1	403,3
11	17,3	17,6	17,0	309,6
12	17,3	17,4	17,2	309,3
13	17,3	17,4	17,3	309,1
14	17,7	17,8	17,6	296,0
15	18,8	19,0	18,6	263,5
16	18,4	18,6	18,3	272,5
17	18,2	18,6	17,9	278,8
18	18,2	18,2	18,1	280,4
19	18,7	18,8	18,6	266,2
20	18,3	18,6	18,1	275,6
21	17,5	17,6	17,4	302,6
22	17,7	18,1	17,4	294,7
23	17,9	18,1	17,7	288,6
24	18,1	18,1	18,0	283,5
25	19,2	19,7	18,7	250,7
26	18,6	18,7	18,5	269,0
27	18,4	18,7	18,1	274,1
28	18,1	18,6	17,6	283,6
29	17,9	18,0	17,8	288,6
30	17,9	18,0	17,8	288,7
31	17,7	17,7	17,7	296,2
32	18,0	18,2	17,8	286,7
33	18,0	18,4	17,5	287,3
34	18,5	19,2	17,8	270,9

Продолжение таблицы 1 приложения Б. Результаты промеров микротвердости				
35	18,2	18,5	18,0	279,0
36	18,5	18,9	18,1	271,0
37	18,4	18,4	18,4	272,9
38	18,5	18,9	18,1	271,3
39	18,2	18,2	18,2	279,4
40	18,7	18,8	18,5	266,2
41	18,3	18,4	18,1	277,8
42	18,1	18,4	17,8	282,3
43	18,3	18,4	18,1	277,7
44	18,9	19,4	18,3	260,8
45	18,4	18,7	18,1	273,9
46	18,2	18,3	18,0	280,9
47	17,6	18,1	17,0	299,5
48	18,7	19,0	18,3	266,2
49	18,3	18,5	18,0	277,2
50	17,5	17,6	17,5	301,5
51	18,0	18,1	17,8	287,7
52	18,5	18,6	18,4	270,6
53	18,3	18,5	18,2	275,4
54	18,4	18,6	18,2	274,1
55	18,3	18,4	18,2	276,0
56	18,1	18,3	17,9	282,3
57	18,0	18,4	17,5	287,1
58	17,5	17,9	17,0	303,6
59	18,3	18,7	17,8	277,9
60	18,0	18,3	17,7	285,9

Таблица 2 приложения Б. Результаты изменения толщины режущей кромки от наработки

Наработка, ч	Толщина режущей кромки, $\Delta 2p$, мм	
	Эталон (сталь 9XC)	Упрочненный (сталь 9XC+CrN)
0	0,15	0,2
4	0,19	0,235
8	0,24	0,256
12	0,27	0,28
16	0,29	0,3
20	0,33	0,3
24	0,346	0,32
28	0,356	0,3176
32	0,389	0,362
36	0,412	0,379
40	0,447	0,3921
44	0,498	0,42
48	0,512	0,44
52	0,558	0,4875
56	0,578	0,51

Таблица 3 приложения Б. Результаты изменения угла заточки режущих элементов от наработки

Наработка, ч	Угол заточки, $\Delta\beta$, град	
	Эталон (сталь 9ХС)	Упрочненный (сталь 9ХС+CrN)
0	20	23
4	20	23
8	21	23
12	21	24
16	22,5	24
20	22,5	24
24	24	25
28	24	25
32	25,5	25
36	27	26
40	28	26
44	28	27
48	29	27
52	29	28
56	30	28

Таблица 4 приложения Б. Результаты исследований износа по нормали ΔC , мм от наработки, ч

Наработка, ч	Износ по нормали ΔC , мм	
	Эталон (сталь 9ХС)	Упрочненный (сталь 9ХС+CrN)
0	0	0
4	0,065	0,024
8	0,0987	0,0347
12	0,1232	0,0656
16	0,2493	0,098416
20	0,2912	0,1291
24	0,333	0,1496
28	0,3765	0,1896
32	0,4987	0,2417
36	0,5491	0,2609
40	0,6345	0,347
44	0,67659	0,415
48	0,7012	0,489
52	0,816	0,5124
56	0,91	0,56

Таблица 5 приложения Б. Результаты исследований относительной потери массы режущих элементов от наработки

Наработка, ч	Относительная потеря массы, Δm , г	
	Эталон (сталь 9ХС)	Упрочненный (сталь 9ХС+CrN)
4	0,2694	0,0597
8	0,5831	0,1499
12	0,9521	0,2253
16	1,4084	0,3298
20	1,9411	0,4998
24	2,1334	0,5999
28	2,3115	0,7856
32	2,6456	0,9956
36	2,9734	1,0934
40	3,385	1,345
44	3,7098	1,4627
48	4,162	1,7684
52	4,6005	1,9741
56	4,939	2,11

Таблица 6 приложения Б. Результаты исследований суммарной степени коррозионного поражения поверхности G %, от наработки, ч

Наработка, ч	Степень коррозионного поражения поверхности G %	
	Эталон (сталь 9ХС)	Упрочненный (сталь 9ХС+CrN)
8	5,2	0,8
16	10,5	1,5
24	15,6	2,3
32	20,8	3
40	25,8	3,8
48	30,9	4,5
56	36	5,3

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА
имени К.А. Тимирязева,
доктор биологических наук, профессор



М.И. Селионова
« 07 » 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «Государственный
испытательный центр»,
кандидат технических наук, доцент



И.Л. Приходько
« 07 » 2025 г.

АКТ

внедрения методики ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель директора ФГБУ «Государственный испытательный центр», кандидат технических наук М.И. Горшков с одной стороны, и представители ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева» зав. кафедрой сопротивления материалов и деталей машин, д.т.н., профессор Казанцев С.П., профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин, академик РАН, д.т.н., Ерохин М.Н., доцент кафедры сопротивления материалов и деталей машин, к.т.н., доцент Скороходов Д.М., а также генеральный директор ООО «Производственное объединение Зубцовский механический завод» Павлов А.С. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства принята ФГБУ «Государственный испытательный центр», для использования при ресурсных испытаниях машин и оборудования для животноводства.

Методика позволяет оценивать эффективность упрочняющих технологий режущих элементов.

Заместитель директора ФГБУ
«Государственный испытательный центр»,
кандидат технических наук



М.И. Горшков

Заведующий кафедрой сопротивления
материалов и деталей машин, ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева, доктор технических наук, профессор



С.П. Казанцев

Профессор кафедры сопротивления материалов и деталей машин
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,
Академик РАН, доктор технических наук, профессор



М.Н. Ерохин

Доцент кафедры сопротивления материалов и деталей машин
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,
кандидат технических наук, доцент



Д.М. Скороходов

Генеральный директор ООО
«Производственное объединение
Зубцовский механический завод»



А.С. Павлов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Титульный лист утвержденной методики

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА
имени К.А. Тимирязева,
доктор биологических наук, профессор



М.И. Селионова
2025 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «Государственный
испытательный центр»,
кандидат технических наук, доцент



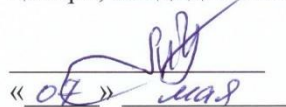
И.Л. Приходько
2025 г.

МЕТОДИКА

ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин
для животноводства и кормопроизводства

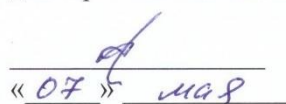
СОГЛАСОВАНО:

Заместитель директора
«Государственный испытательный
центр», кандидат технических наук



М.И. Горшков
2025 г.

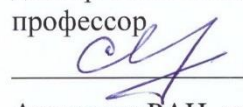
И.о. директора института механики и
энергетики имени В.П. Горячкина,
доктор технических наук, профессор



А.Г. Арженовский
2025 г.

РАЗРАБОТЧИКИ:

Зав. кафедрой сопротивления
материалов и деталей машин,
доктор технических наук,
профессор



С.П. Казанцев

Академик РАН, доктор
технических наук, профессор



М.Н. Ерохин

Кандидат технических наук,
доцент



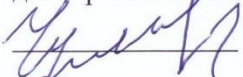
Д.М. Скороходов

Генеральный директор ООО
«Производственное объединение
Зубцовский механический завод»



А.С. Павлов

Технический директор ООО
«Производственное объединение
Зубцовский механический завод»,
доктор технических наук



Н.Н. Чупятлов

Заведующий лабораторией
кафедры сопротивления
материалов и деталей машин



Н.Д. Самуков

Москва – 2025

Титульный лист



Выходные данные научного издания методики

УДК 620.16:631.3
ББК 40.72
М 545

Рецензенты:

Кирсанов В.В. – чл.-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор, зав. отделом механизации и автоматизации животноводства (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ);

Голубев И.Г. – доктор техн. наук, профессор, зав. отделом, главный научный сотрудник отдела научно-информационного обеспечения инновационного развития АПК (ФГБНУ «Росинформагротех»).

Коллектив авторов:

**М 545 Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Скороходов Д.М.,
Чупятков Н.Н., Павлов А.С., Самуков Н.Д.**

Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Д.М. Скороходов [и др.]. – М.: МЭСХ, 2025. – 28 с.

ISBN 978-5-6052635-2-4

Методика относится к ускоренным ресурсным испытаниям на коррозионно-механический износ режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства.

Методика ускоренных ресурсных испытаний предназначена для оценки ресурса испытуемого образца изделия (режущего элемента) до достижения заданного предельного значения установленного параметра или оценки значения этого параметра, соответствующего заданной наработке изделия в нормальном режиме; позволяет оценивать эффективность упрочняющих технологий.

Для магистров, аспирантов, научных и научно-педагогических работников высших учебных заведений и сотрудников научно-исследовательских институтов, проводящих исследования по ресурсным испытаниям на коррозионно-механический износ режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства.

Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства утверждена и внедрена 7 мая 2025 года ФГБУ «Государственный испытательный центр» и ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

УДК 620.16:631.3
ББК 40.72

ISBN 978-5-6052635-2-4

© Коллектив авторов, 2025

Оглавление

1. Сущность методики.....	4
2. Общие положения.....	4
3. Требования к безопасности.....	5
4. Оборудование и субстрат для ресурсных испытаний режущих элементов.....	5
5. Экспериментальные и эталонные образцы (режущие элементы).....	11
6. Подготовка к испытаниям.....	12
7. Проведение испытаний.....	13
8. Обработка результатов исследований.....	14
Список использованных источников.....	20
Приложения.....	21

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Апробация исследований



УдГАУ
УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Удмуртский государственный аграрный университет»

ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Павлов Александр Сергеевич
за участие

***в Международной научно-практической конференции
«Развитие инженерного образования и его роль
в техническом обеспечении инновационных технологий
АПК»,
посвященной 70-летию инженерного факультета
Удмуртского государственного аграрного университета***

Ректор



А.А. Брацихин

***14 ноября 2025
г. Ижевск***

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

Международная научная конференция
молодых учёных и специалистов,
посвящённая 150-летию со дня рождения
Миловича Александра Яковлевича

Выдан

Павлов Александр Сергеевич
за доклад на тему:

Физико-механические свойства сталей, применяемых при изготовлении рабочих органов
кормоприготовительных машин для животноводства

на секции

Современное развитие технического обеспечения производственных процессов в АПК



Москва, 3-5 июня 2024 г.



В.И. Трухачев
Ректор,
Академик РАН,
профессор

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

Международная научная конференция
молодых учёных и специалистов, посвящённая
160-летию Тимирязевской академии

Выдан

Павлов Александр Сергеевич
за доклад на тему:

Разработка методики ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных ма-
шин для животноводства и кормопроизводства

на секции

Современное развитие технического обеспечения производственных процессов в АПК.



Москва, 2-4 июня 2025 г.



В.И. Трухачев
Ректор,
Академик РАН,
профессор



ЗОЛОТАЯ ОСЕНЬ 2025

XXVII РОССИЙСКАЯ АГРОПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

ДИПЛОМ УЧАСТНИКА

ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева»

за конкурсный проект:

«Установка для ускоренных испытаний на коррозионно-механический износ
режущих элементов сельскохозяйственных машин»

ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

О.А. ГАТАГОВА