

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов и деталей машин в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Скороходов Дмитрий Михайлович**
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры сопротивления материалов и деталей
машин ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА имени
К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Федоров Сергей Константинович**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры МТ13 Технологии обработки материалов
ФГАОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Петров Виталий Анатольевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Эксплуатация и ремонт машин» ФГБОУ ВО
«Удмуртский государственный аграрный
университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тверская государственная сельскохозяйственная
академия»

Защита состоится 15 октября 2026 года в 12:30 часов на заседании
диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по
адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов):
127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке
имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета
www.timacad.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____

Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., Дж.Ф. Арчард, 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 сельскохозяйственных 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 сельскохозяйственных машин для животноводства. Методика утверждена и внедрена в мае 2025 г. ФГБУ «Государственный испытательный центр» и ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика работы, изложены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов исследований, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков и их влияние на коррозионно-механическое изнашивание. Изложены результаты анализа качества режущих элементов машин для животноводства. На основе анализа литературных источников, собственных исследований, а также каталогов современной сельскохозяйственной техники для животноводства разработана классификация рабочих органов смесителей-кормораздатчиков. Представлен анализ методов и средств испытания рабочих органов на коррозионно-механическое изнашивание и сформулированы требования к новой методике ресурсных испытаний режущих элементов. Сделаны основные выводы, определены цель и задачи исследования.

На основе анализа рационов для крупного рогатого скота, определен средний рацион от массы замеса: 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%.

Усредненный рацион КРС позволил определить количественные характеристики кормовой среды (рис. 1), формирующие условия эксплуатации рабочих органов смесителей-кормораздатчиков в зависимости от сезона (зима/лето).

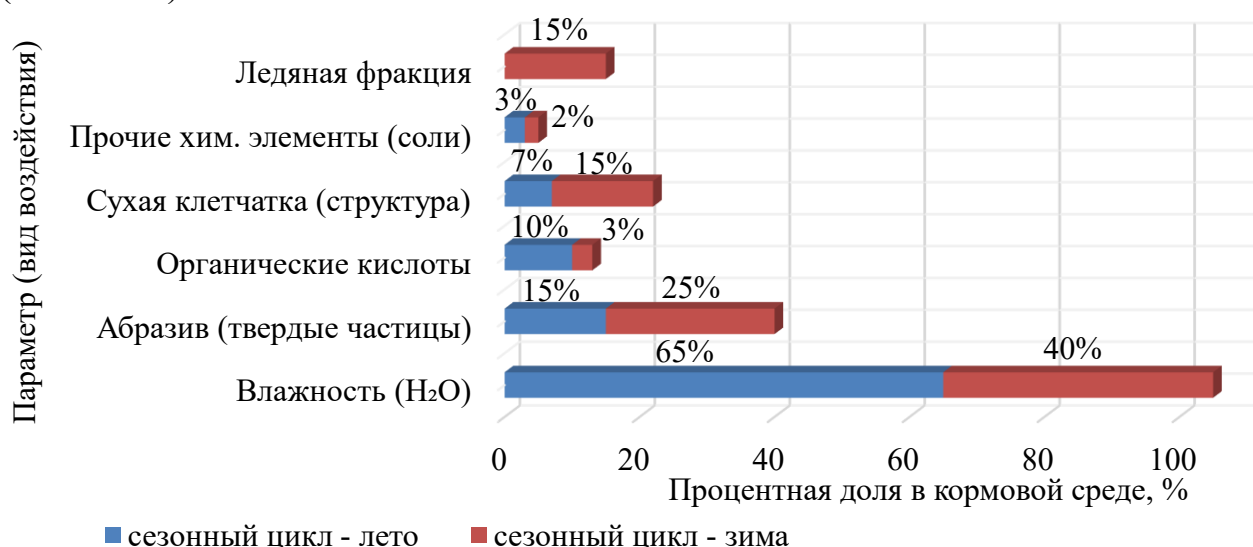


Рисунок 1 – Характеристика кормовой среды при зимнем и летнем сезонах,

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., а также Вайсбаха Ф. 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. 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.

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.

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. 2).

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.



Рисунок 2 – Основные дефекты режущих элементов

Режущие элементы (ножи) играют ключевую роль в измельчении и гомогенизации кормовой смеси, определяя качество конечного продукта. Анализ современных смесителей-кормораздатчиков, показал, что большинство рабочих органов являются импортными, изготовленными из высокопрочных материалов, показатели твердости и долговечности которых в 1,5-2 раза превышают характеристики стандартных отечественных аналогов.

В условиях санкционных ограничений особую актуальность приобретает задача импортозамещения дорогостоящих запасных частей (рабочих органов), обеспечивающих высокую надежность и работоспособность. Это требует

разработки современных методов и средств оценки долговечности рабочих органов в условиях эксплуатации, характерных для животноводческих предприятий.

В основу создания таких методов лежит теория резания и взаимодействия рабочих органов со средой, разработанная академиком В.П. Горячкиным.

Повышению надежности сельскохозяйственной техники посвящены научные труды ученых: Черноиванова В.И., Ерохина М.Н., Измайлова А.Ю., Дидманидзе О.Н., Дорохова А.С., Гайдара С.М., Апатенко А.С., Алдошина Н.В., Лялякина В.П., Северного А.Э. Пучина Е.А., Халфина М.Л., Михлина В.М., Андреева С.А., Денисова В.А., Девянина С.Н., Савиных П.А., Булатова С.Ю., и др.

Анализ их научных трудов, а также современных методов и средств испытания рабочих органов, в том числе на коррозионно-механическое изнашивание, позволил выявить следующие основные недостатки: ориентация существующих методик преимущественно на почворежущие элементы; отсутствие возможности проведения испытаний режущих элементов, работающих в кормовых средах, характерным для животноводства (невозможность моделировать коррозионно-механическое воздействие); невозможность одновременных сравнительных испытаний нескольких образцов с различными материалами и упрочняющими покрытиями в идентичных условиях.

Во второй главе обоснован субстрат для ускоренных испытаний, обоснованы конструктивные параметры установки для ускоренных испытаний, получена математическая модель прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания.

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 (фракция 3-5 мм) – 25-40% объема бункера. Они выполняют функцию связующего элемента, обеспечивая усталостное и абразивное изнашивание режущих элементов;

- кварцевый песок (фракция 0,1-0,25 мм) – 10% объема засыпаемой смеси. Данная концентрация является оптимальной для форсирования абразивного изнашивания;

- органические кислоты:

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



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



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



- влажность среды (50-90 %) – охватывает все типы кормов, обеспечивая условия для электрохимической коррозии и адгезионно-механического изнашивания.

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

- частота вращения режущих элементов ($250-500 \text{ мин}^{-1}$), в 3-5 раз превышает частоту вращения шнековых рабочих органов смесителей-кормораздатчиков, что обеспечивает форсирование испытаний.

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

Выбранные концентрации компонентов обеспечивают форсирование режимов испытаний с общим коэффициентом ускорения (K_y) 3-5, что позволяет сократить продолжительность экспериментов при сохранении достоверности результатов.

Количество одновременно испытываемых образцов n определено из условия обеспечения достоверности результатов и возможностью одновременного сравнения нескольких материалов и упрочняющих технологий.

Схема размещения образцов (рис. 3) предусматривает четыре рабочие зоны, в каждой из которых устанавливается один эталонный и три экспериментальных ножа, обеспечивая трехкратную повторность, возможность сравнения всех вариантов в идентичных условиях, исключая влияние случайных факторов на результат испытания:

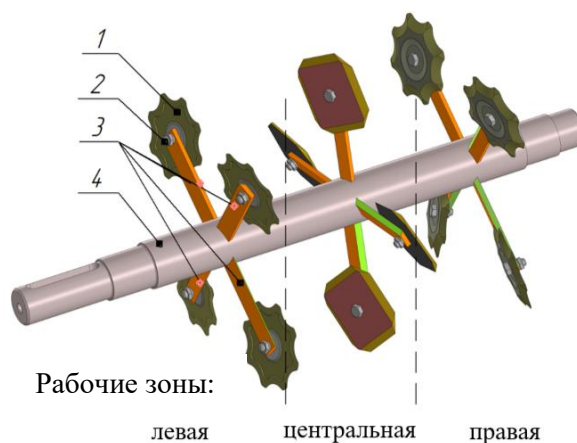


Рисунок 3 – Схема размещения образцов: 1 – испытываемые режущие элементы; 2 – болтовое соединение; 3 – держатель; 4 – вал

$$n = m \cdot (k + 1), \quad (4)$$

где m – число повторностей, k – количество экспериментальных вариантов; 1 – эталонный образец.

Держатели ножей установлены на валу под углом 90° к его оси, при этом в процессе вращения возникает сила резания $F_{рез}$, раскладываемая на радиальные F_r и осевые составляющие F_a (рис. 4).

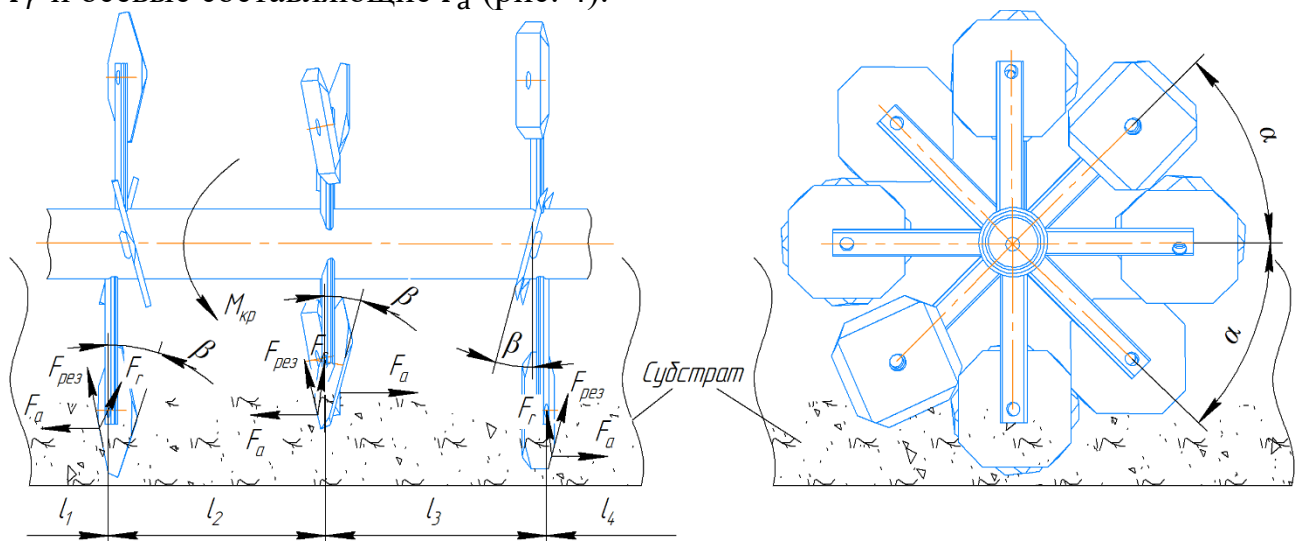


Рисунок 4 – Действующие силы на субстрат

Сила резания $F_{рез}$:

$$F_{рез} = \frac{2M_{кр}}{D \cdot z \cdot \eta}, \quad (5)$$

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

Радиальные силы F_r :

$$F_r = F_{рез} \cdot \cos \beta^\circ, \quad (6)$$

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

Осевые силы F_a :

$$F_a = F_{рез} \cdot \sin \beta^\circ. \quad (7)$$

Суммарная радиальная сила всех (четырех) режущих элементов:

$$\sum F_r = 4 \cdot F_r. \quad (8)$$

Интенсивность циркуляции (сумма модулей осевых сил) в рабочей зоне:

$$\sum F_a = 4 \cdot F_{рез}. \quad (9)$$

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

$$L_{\text{между}}^{\max} = 2 \cdot L_n (\sin \beta + k \cdot \cos \beta), \quad (10)$$

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

Долговечность режущего элемента T представлена функцией нескольких групп параметров:

$$T = f(K, M, G, U), \quad (11)$$

где K – параметры кинематики (скорость резания, траектория); M – механические свойства материала (твердость, прочность); G – геометрические параметры лезвия (угол заточки, толщина); U – параметры внешней среды (абразивность, кислотность, влажность).

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

получена математическая модель для прогнозирования долговечности режущих элементов в условиях коррозионно-механического изнашивания:

$$T_p = \frac{\Delta m_{кр}}{k_1 \cdot \frac{P \cdot \vartheta}{H} (1 + \alpha \cdot \sum_{i=1}^3 C_i) \cdot \varphi^m + k_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \cdot K_y, \quad (12)$$

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.

Для оценки долговечности режущих элементов, на основе литературного анализа и требований к качеству кормоприготовления, определены следующие предельные значения: 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 $G_{кр} = 15\%$; критическая потеря массы $\Delta m = 10\%$ от исходной массы образца. Установленные критерии позволяют фиксировать момент достижения режущим элементом предельного состояния и использовать математическую модель для прогнозирования долговечности.

Данная математическая модель позволяет оценить долговечность режущих элементов с учетом комплексного воздействия абразивного коррозионно-механического изнашивания. Наличие коэффициента ускорения K_y позволяет пересчитывать результаты стендовых испытаний в прогнозируемый эксплуатационный ресурс.

В третьей главе представлена методика ускоренных испытаний режущих элементов машин для животноводства (рис. 5), описывается объект исследования, приведено описание установки для ускоренных испытаний, приведен алгоритм экспериментальных исследований (измерения толщины режущей кромки режущего элемента, оценка уровня коррозионно-механического изнашивания режущих элементов), дана характеристика приборного обеспечения исследуемых параметров.

Сущность методики заключается в ускоренных испытаниях режущих элементов в субстрате, имитирующем коррозионно-механическое воздействие на исследуемые материалы с последующей оценкой износа по массе, геометрии лезвия и коррозионным поражениям.

Методика предусматривает два этапа испытаний: стендовые ускоренные ресурсные испытания (этап 1) проводятся на установке (патент RU2842437), схема которой представлена на рисунке 6; эксплуатационные испытания (этап 2) проводятся в условиях эксплуатации конкретных машин для измельчения кормов.

Перед началом испытаний режущие элементы маркируют на нерабочей поверхности с помощью лазерного гравировщика по металлу и контролируют исходные параметры (масса, геометрические параметры, наличие коррозионных пятен) с последующей регистрацией в протоколы испытаний.

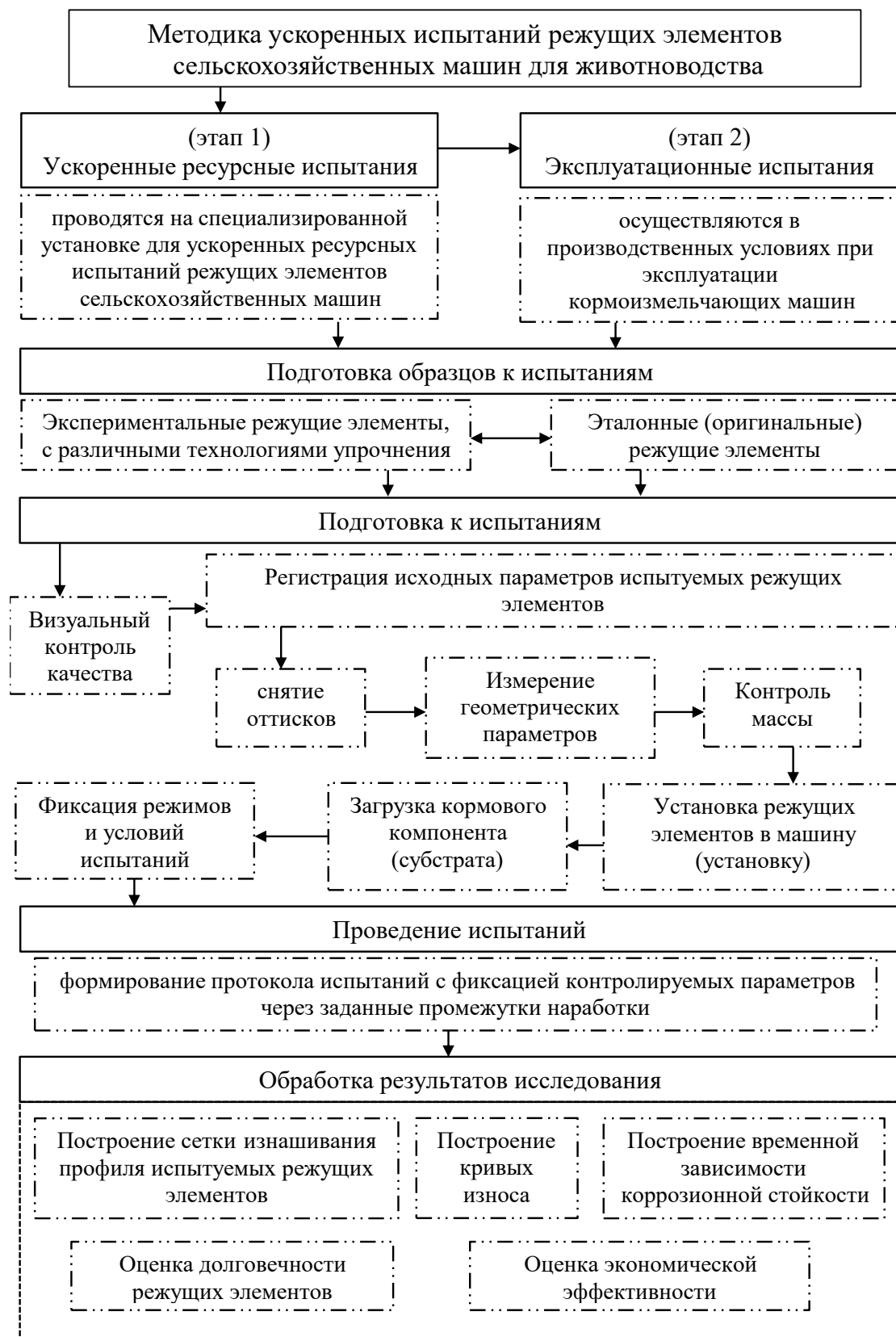


Рисунок 5 – Методика ускоренных испытаний режущих элементов

За эталонный образец 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). Упрочнение экспериментальных режущих элементов проводилось CVD-методом металлоорганических соединений.

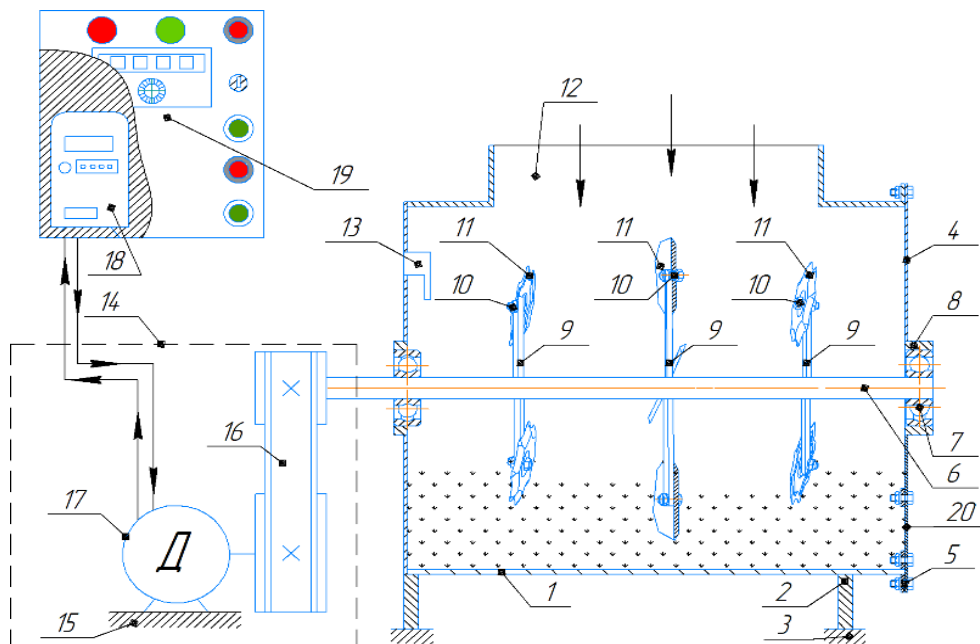


Рисунок 6 – Принципиальная схема установки для ускоренных испытаний режущих элементов машин для животноводства:

1 – корпус; 2 – стойка; 3, 15 – опора; 4 – крышка; 5, 10 – болтовое соединение; 6 – вал; 7 – подшипник качения; 8 – втулка; 9 – пластина; 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

Оценка долговечности выполнялась путем сравнения геометрических и массовых характеристик, в том числе коррозионной стойкости опытных образцов с эталонными.

Испытания проводились циклически: 14 циклов по 4 часа каждый с промежуточными измерениями контролируемых параметров. Режимы испытаний: частота вращения – 300 мин^{-1} . Состав субстрата: древесные опилки фракцией 3-5 мм (30 % объема бункера); кварцевый песок фракцией 0,1-0,25 мм (10 % объема засыпаемой смеси); 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 НТ, при этом влажность поддерживали на уровне $70 \pm 5\%$, температура испытаний составляла $20-25^\circ\text{C}$. Кислотность среды определяли рН-метром, рН поддерживали на уровне $4,5 \pm 0,2$.

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

Для каждого режущего элемента определялась потеря массы после i -го этапа испытаний:

$$\Delta m_i = m_0 - m_i, \quad (13)$$

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

Средняя потеря массы для группы однотипных образцов (эталонных и экспериментальных) определялась по выражению:

$$\overline{\Delta m} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta m_j, \quad (14)$$

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

Интенсивность изнашивания (скорость потеря массы) определялась выражением:

$$I = \frac{\Delta m}{t}, \quad (15)$$

где t – время этапа испытаний, мин.

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

$$U = \frac{I_{\text{эт}} \cdot \rho_{\text{эт}}}{I_{\text{оп}} \cdot \rho_{\text{оп}}}, \quad (16)$$

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.

Контроль геометрических параметров исследуемых изделий осуществлялся контактными методами измерения.

Анализ изменения геометрии лезвия режущего элемента осуществлялся путем снятия оттисков на свинцовые пластинки.

Толщина режущей кромки режущих элементов определялась по выражению:

$$2\rho_k = \frac{\sum_{i=1}^n 2\rho_k^i}{n}, \quad (17)$$

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

Износ по нормали к лезвию:

$$\Delta C_k = \frac{\sum_{i=1}^n (C_0^i - C_k^i)}{n}, \quad (18)$$

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

Угол заточки β_k , град.:

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_k^i}{n}, \quad (19)$$

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

Для анализа геометрических измерений лезвия в процессе изнашивания и характера распределения линейного износа по его поверхности, при необходимости, строится сетка изнашивания.

Степень поражения поверхности металла коррозией пятнами определялась по ГОСТ 9.908-85:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100\%, \quad (20)$$

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

Измерения микроструктуры упрочненного покрытия проводили на микроскопе AXIO Observer.A1m, 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.

Измерение микротвёрдости проводили в соответствие с ГОСТ 9450-76. Толщина покрытия определялась по методу косых шлифов.

Долговечность режущих элементов оценивалась по первому достигнутому предельному состоянию.

Результаты исследований записывались в протоколы испытаний. Статистическая обработка результатов исследований осуществлялась с помощью программного обеспечения Statistica 10 и Microsoft Excel 2024 с последующей графической интерполяцией результатов исследований.

В четвертой главе представлены результаты исследований и рекомендации по совершенствованию методики.

Работоспособность разработанной установки подтверждена прочностным расчетом. Прочностной анализ сварного соединения держателя ножей с валом установки в программе Solidworks Simulation (рис. 7) показал, что максимальное напряжение в месте соединения держателя ножа и вала (сварной шов) составляет 90 МПа, что меньше предела текучести материалов: для стали Ст3сп (держатель ножа) $\sigma_T = 245 \dots 260$ МПа; для стали 20 (вал) - $\sigma_T = 220 \dots 250$ МПа).

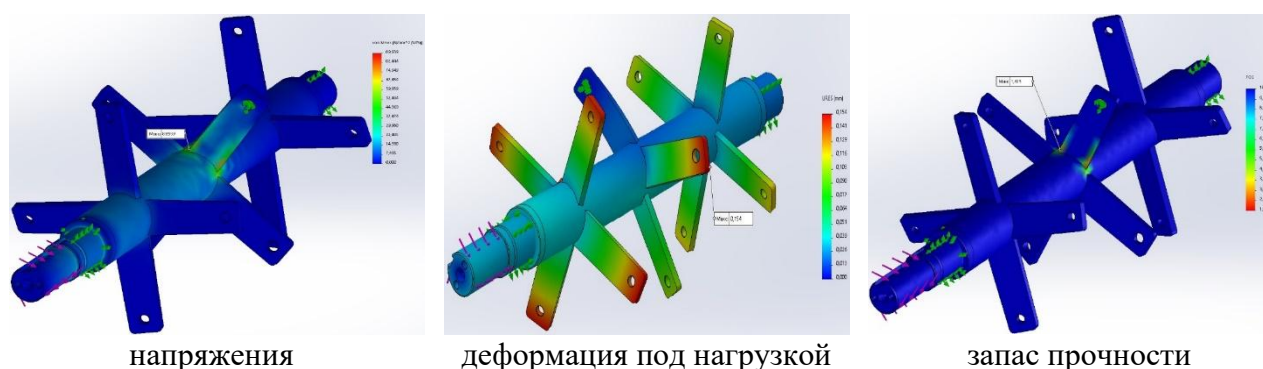


Рисунок 7 – Прочностной анализ сварного соединения держателя ножей с валом установки в программе Solidworks Simulation

Максимальная деформация составила 0,154 мм, что не превышает допустимых значений для данного типа оборудования и не приводит к нарушению кинематики узла и повышенному биению в процессе работы.

Коэффициент запаса прочности сварного соединения $n_{CB} = 1,6$ превышает допускаемые значения для статических нагрузок. Следовательно, вал установки соответствует условиям прочности с запасом.

Установлен оптимальный угол крепления режущих элементов к держателю составляет $\beta = 15^\circ$. При данном угле обеспечивается рациональное соотношение радиальной и осевой составляющих силы: $F_r = 0,966 \cdot F_{рез}$; $F_a = 0,259 \cdot F_{рез}$, что обеспечивает равномерное распределение субстрата (подтверждено видеоматериалами).

Эффективное перемешивание субстрата обеспечивается чередованием углов (рис. 8) $+15^\circ$ и -15° в каждой рабочей зоне, которое создает замкнутые циркуляционные контуры, исключая сепарацию абразивных частиц и обеспечивающие равномерный износ всех режущих элементов. При этом суммарная осевая сила в зоне равна нулю (отсутствует снос материала к торцам установки), а интенсивность циркуляции составляет $\sum |F_a| = 1,036 \cdot F_{рез}$.

Разработана установка для ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства (патент RU2842437) (рис. 9), позволяющая проводить ускоренные испытания до 12 образцов одновременно в условиях, моделирующих коррозионно-механическое воздействие кормовых сред.

Металлографический анализ полученных CVD-методом образцов (рис. 9) 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.

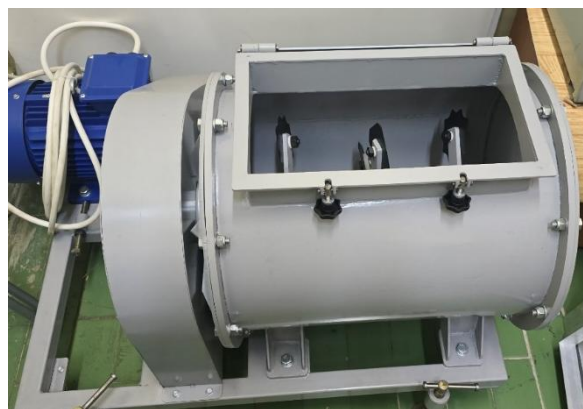


Рисунок 8 – Установка для ресурсных испытаний режущих элементов машин для животноводства

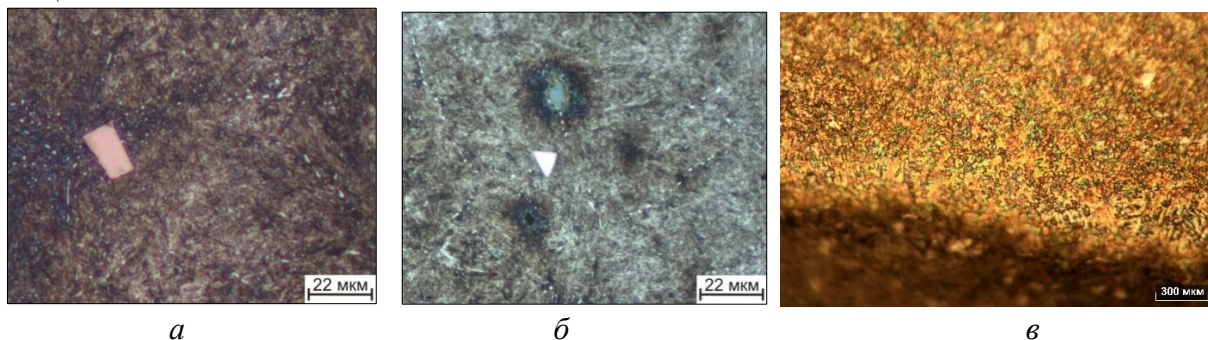


Рисунок 9 – Микроструктура покрытия стали 9ХС после CVD-осаждения: а – нитриды и карбонитриды (х450) место 2; б – силикаты и нитриды (х450) место 3; в – общий вид упрочненного слоя (х100)

Микротвердость нитридохромового покрытия стали 9ХС составляет 600 ед. $HV_{0,05}$, что выше значений основы материала в два раза. Толщина покрытия CrN составляет 50 мкм (рис. 10).

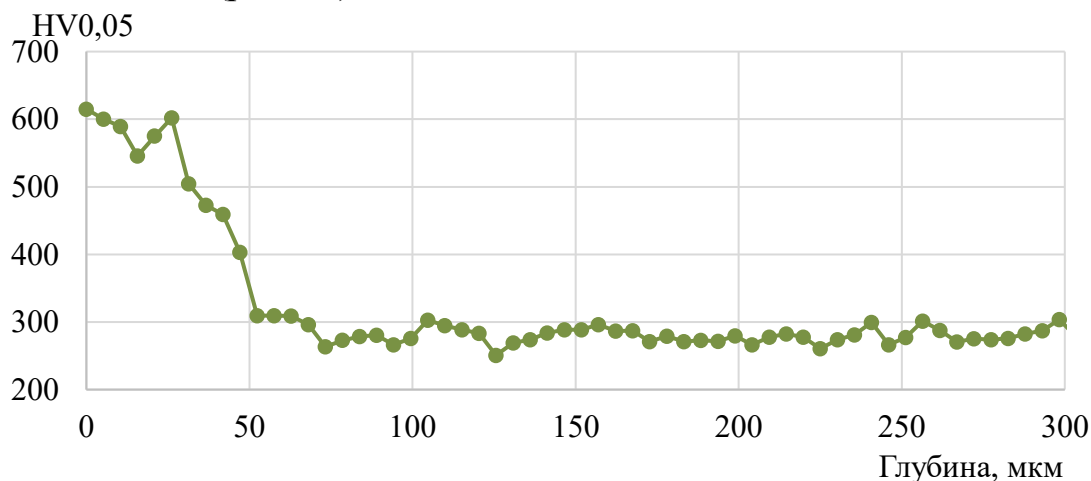


Рисунок 10 – Результаты измерений микротвердости упрочненного CrN – покрытия стали 9ХС

В ходе ускоренных ресурсных испытаний установлены линейные зависимости (рис. 11-13) изменения геометрических параметров режущей кромки с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,96...0,99$, что подтверждает достоверность полученных данных.

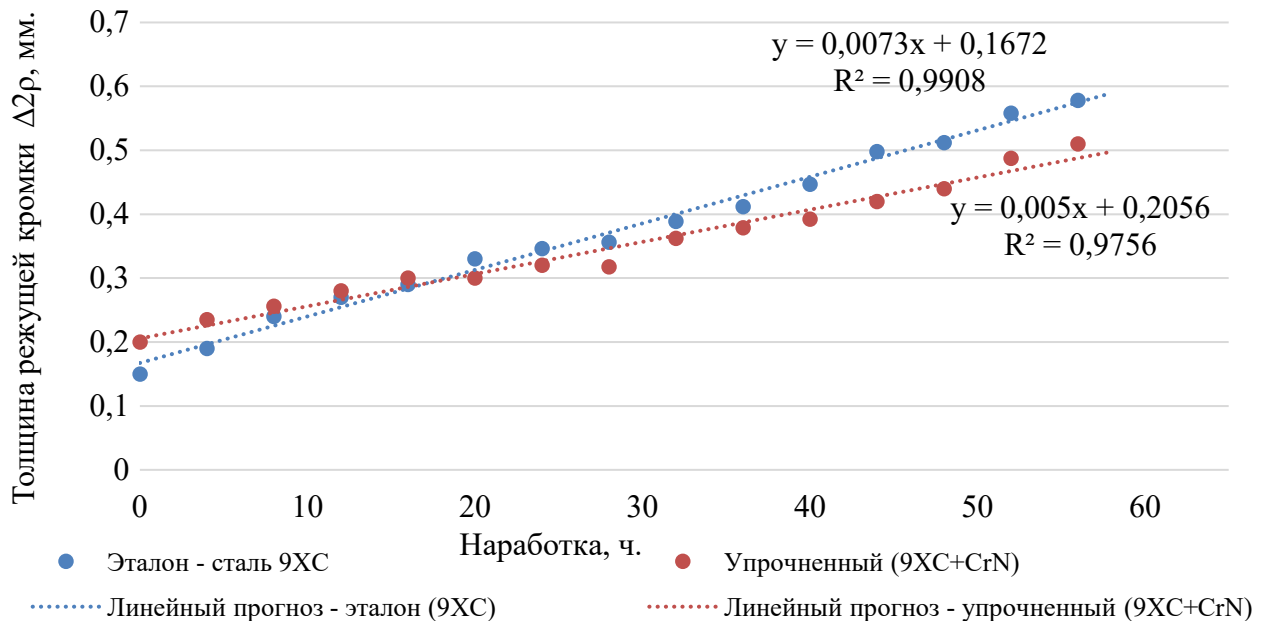


Рисунок 11 – Результаты исследований износа толщины режущей кромки $\Delta 2\rho$, мм от наработки, ч.

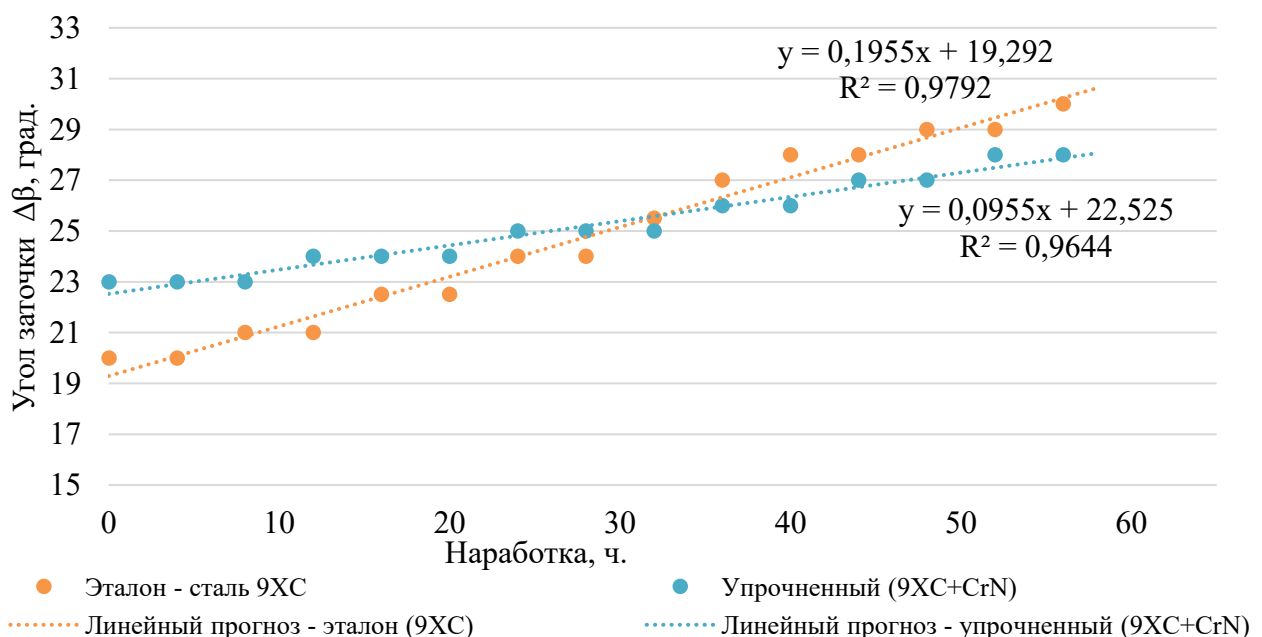


Рисунок 12 – Результаты изменения угла заточки $\Delta\beta$, град от наработки, ч.

Установлено, что CVD-покрытие CrN обеспечивает снижение скорости затупления режущей кромки в 1,38 раза (рис. 11), скорости увеличения угла заточки в 2 раза (рис. 12), скорости износа по нормали – в 1,6 раза (рис. 13) по сравнению с неупрочненной сталью.

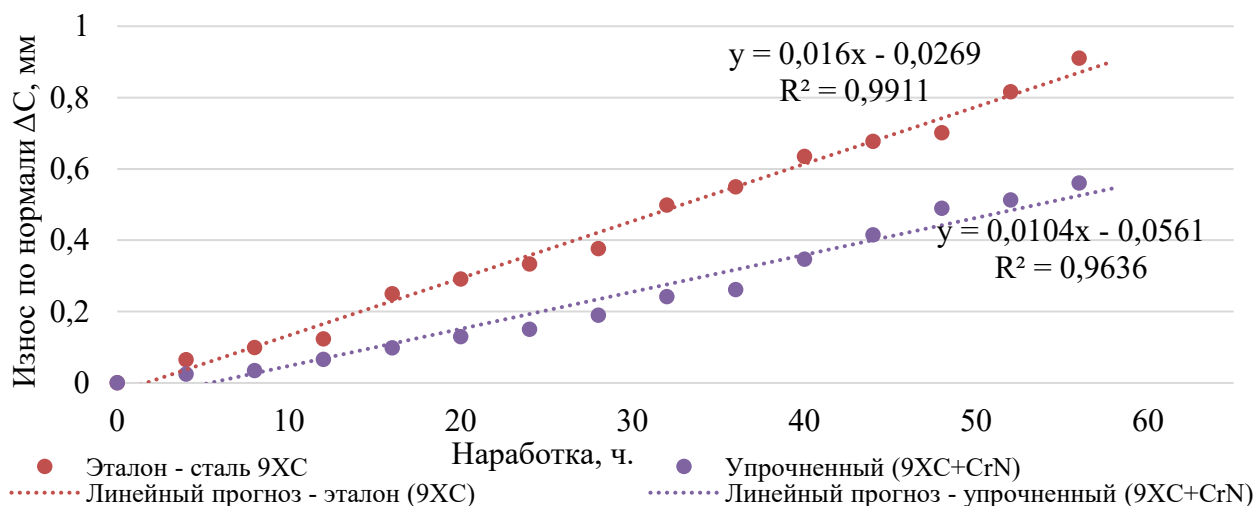


Рисунок 13 – Результаты исследований износа по нормали ΔC, мм от наработки, ч.

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

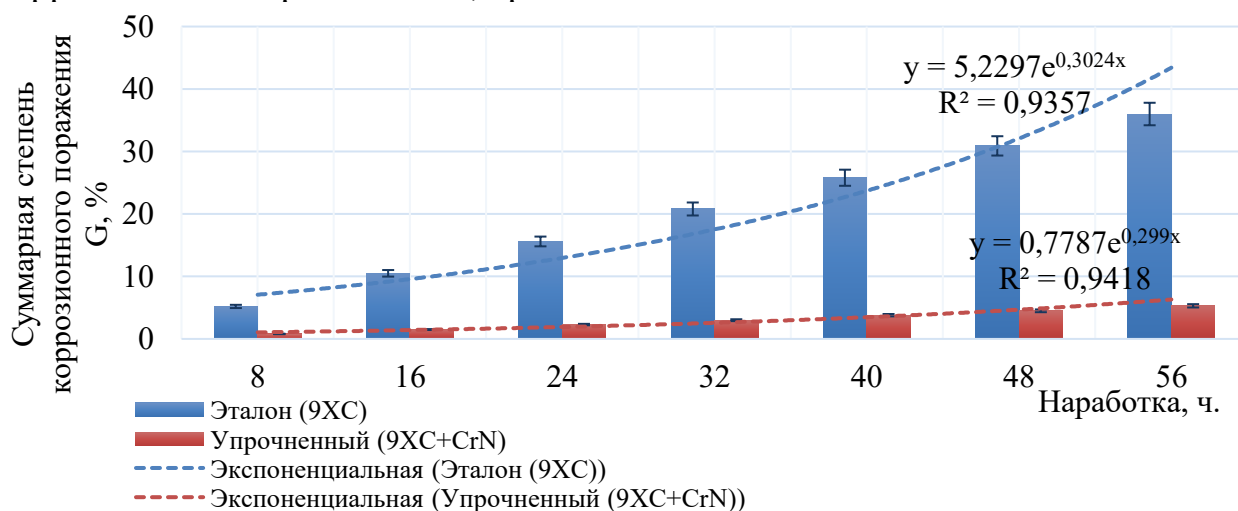


Рисунок 14 – Результаты исследований суммарной степени коррозионного поражения поверхности G %, от наработки, ч.

По результатам исследований измерения массы испытуемых образцов установлено, что за 56 ч. суммарной наработки потеря массы эталонного образца составила 2,9% от исходной, а упрочненного – 1,15%. Упрочнение поверхности обеспечило снижение скорости потери массы в 2,34 раза, и снижение относительной потери массы в 2,52 раза (рис. 15).

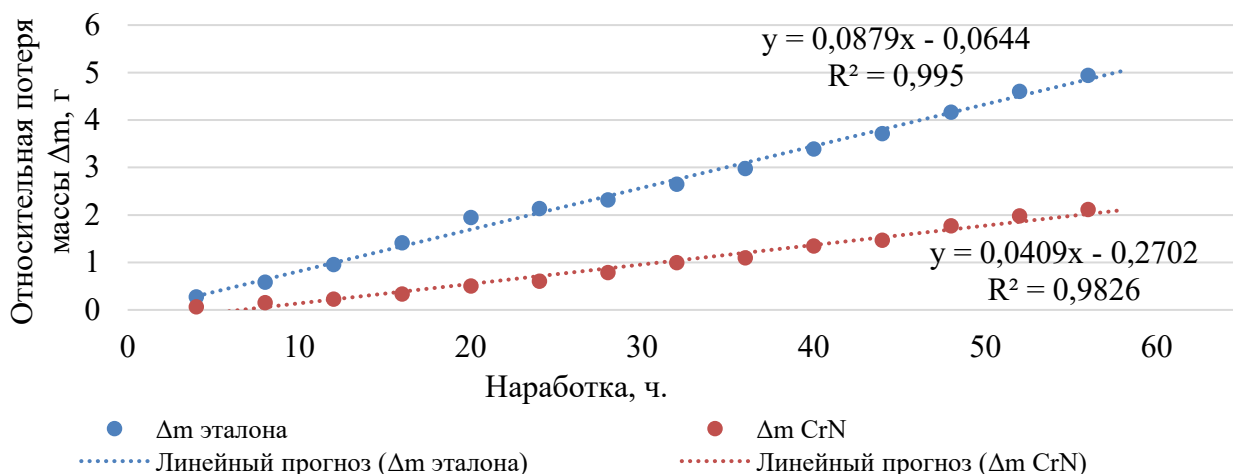


Рисунок 15 – Результаты исследований относительной потери массы режущих элементов Δm , г от наработки, ч.

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. 16, 17).

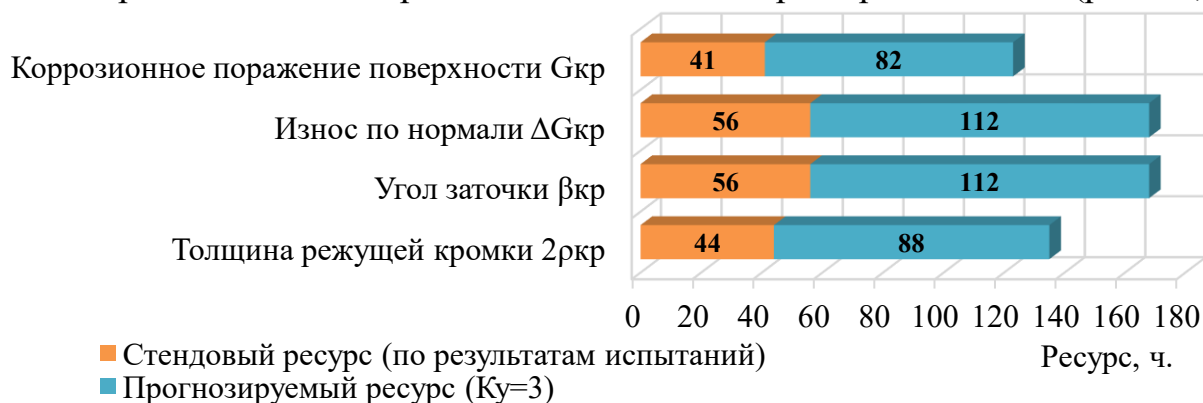


Рисунок 16 – Результаты исследований прогнозирования долговечности режущих элементов эталонных (базовых) образцов (сталь 9ХС)

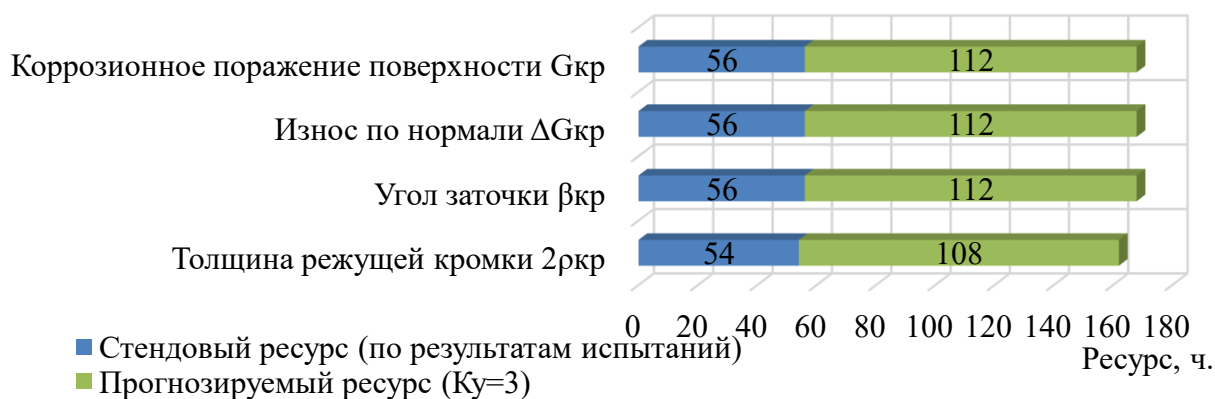


Рисунок 17 – Результаты исследований прогнозирования долговечности режущих элементов упрочненных образцов (сталь 9ХС+CrN)

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 режущий элемент в 1,32 раза превосходит по прогнозируемому ресурсу неупрочненных режущих элементов.

В пятой главе приведены рекомендации по внедрению разработанной методики ресурсных испытаний в практику испытательных центров и предприятий-изготовителей и выполнена оценка экономической эффективности применения разработанной методики.

Разработанная 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 $2\rho_{кр} = 0,5$ мм; угол заточки $\beta_{кр} = 30^\circ$; износ по нормали $\Delta C_{кр} = 2$ 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 $+15^\circ / -15^\circ$, 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 ты. 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации:

1. Скороходов, Д. М. Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве / Д. М. Скороходов, А. С. Павлов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2025. – Т. 19, № 4. – С. 91-97. – DOI 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97. – EDN AYURVN.

2. 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.

3. Скороходов, Д. М. Методика оценки долговечности режущих элементов машин и оборудования для животноводства / Д. М. Скороходов, А. С. Павлов // Международный технический журнал. – 2026. – № 1 (101). – С. 66-77.

Статьи в других научных журналах и сборниках, материалах международных и всероссийских конференций:

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. **Павлов, А. С.** Формирование технического оснащения стенда для ускоренных испытаний на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов машин для животноводства / А. С. Павлов // Развитие инженерного образования и его роль в техническом обеспечении инновационных технологий АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию инженерного факультета Удмуртского государственного аграрного университета, Ижевск, 14 ноября 2025 года. – Ижевск: Удмуртский государственный аграрный университет, 2025. – С. 118-123.

Патент на изобретение:

9. 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.

Методика (научная публикация):

10. Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства (научная публикация) / М. Н. Ерохин, С. П. Казанцев, Д. М. Скороходов, Н. Н. Чупятов, **А. С. Павлов**, Н. Д. Самуков. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2025. – 28 с. – ISBN 978-5-605-26352-4.