

На правах рукописи



КАЗАРИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОЙКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Фадеев Иван Васильевич

**Официальные
оппоненты**

Кравченко Игорь Николаевич,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования

Смирнов Анатолий Германович,

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный аграрный университет», доцент кафедры транспортно-технологических машин и комплексов

**Ведущая
организация:**

федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (ФГБНУ ВНИИТиН)

Защита состоится «17» июня 2026 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.031.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: <http://rgatu.ru/>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Юхин Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Совершенствование и повышение эффективности технологии мойки деталей машин АПК является важным фактором обеспечения надежности, долговечности и ремонтпригодности машинно-тракторного парка. В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства и ужесточения экологических требований возрастает необходимость в совершенствовании технологий, сочетающих высокое качество очистки с минимальным расходом воды, энергии и химических реагентов. Традиционные методы мойки, основанные на использовании высокотемпературных моющих растворов и одноразовом водопотреблении, характеризуются значительной ресурсоемкостью и формированием сложных по составу сточных вод. В этой связи совершенствование технологии мойки с применением многофункциональных добавок, обеспечивающим эффективное удаление комплексных конгломератных загрязнений при сниженных температурах и замкнутом цикле использования моющих растворов, приобретает высокую научную и практическую актуальность.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам очистки деталей от эксплуатационных загрязнений и защиты их от коррозии посвящены труды отечественных и зарубежных ученых: Н.В. Бышова, И.А. Успенского, В.И. Карагодина, И.Н. Кравченко, А.Г. Смирнова, Л.Г. Князевой, Н.А. Курьято, А.В. Дорохова, Ш.В. Садетдинова, И.А. Юхина, И.В. Фадеева, А.В. Шемякина, К. Хольмберга, М. Дж. Розена и др. Вопросы классификации загрязнений, разработки моющих составов, применения гидродинамических и ультразвуковых методов очистки получили значительное развитие. Однако недостаточно исследованы механизмы комплексного воздействия многофункциональных добавок на структурно-механические свойства конгломератных отложений, характерных для агрегатов машин АПК. Не решена задача интеграции химических и физических методов очистки в единую технологию с организацией рециркуляции и регенерации моющих растворов, способных обеспечить экономию ресурсов.

Связь работы с научными программами и темами. Настоящая диссертационная работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО РГАТУ на 2021-2025 гг. в рамках научного направления темы 1: «Совершенствование технологий, средств механизации, электрификации и технического сервиса в сельскохозяйственном производстве. Перспективы развития сельских территорий», раздела 1.1: «Повышение эффективности

эксплуатации мобильной техники за счет разработки новых конструкций и совершенствования методов поддержания её технического состояния», подраздела 1.1.3: «Обеспечение работоспособности в эксплуатации транспортно-технологических средств путем совершенствования их конструкций, технологий и средств технического воздействия». Исследование непосредственно направлено на решение задач, заявленных в подразделе 1.1.3, путем совершенствования технологии мойки деталей машин АПК.

Цель исследования. Обоснование параметров ресурсосберегающей технологии мойки деталей машин АПК.

Задачи исследования:

1. Провести анализ и идентифицировать морфологический состав и физико-химические свойства типовых загрязнений деталей основных агрегатов машин АПК.

2. Синтезировать лабораторный образец моющей композиции с многофункциональными добавками, адаптированный для удаления выявленного спектра загрязнений.

3. Провести оценку функциональных свойств синтезированной моющей композиции.

4. Исследовать влияние параметров (температура, концентрация компонентов, продолжительность) на эффективность процесса мойки.

5. Обосновать параметры ресурсосберегающей мойки и сформировать рекомендации по организации рециркуляции и регенерации моющих растворов.

6. Выполнить технико-экономическую и экологическую оценки эффективности усовершенствованной технологии мойки.

Объект исследования – процесс мойки деталей машин АПК.

Предмет исследования – технология мойки деталей с применением моющей композиции на основе многофункциональных добавок.

Научная новизна работы:

1. Установлены количественные закономерности формирования и удаления конгломератных загрязнений деталей агрегатов машин АПК, имеющих состав минеральная : нефтяная : связующая = 3 : 1 : 1.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден синергетический эффект многофункциональной моющей композиции на основе неионогенных и анионных поверхностно-активных веществ (ПАВ) в соотношении 3:1.

3. Получена математическая модель процесса мойки, учитывающая влияние концентрации ПАВ, тетраборфосфата калия, температуры и времени обработки.

4. Обоснована трехстадийная схема мойки (иммерсионная без перемешивания – иммерсионная с перемешиванием – струйная обработка) с системой рециркуляции и регенерации, обеспечивающая до 25 циклов использования моющего раствора.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в обосновании параметров ресурсосберегающей мойки деталей, установлении закономерностей взаимодействия многофункциональных моющих композиций с комплексными загрязнениями и создании адекватной математической модели процесса ресурсосберегающей мойки.

Практическая значимость подтверждена трехстадийной технологической схемой ресурсосберегающей мойки, регламентами ее применения и методикой расчета экономического эффекта. Внедрение ресурсосберегающей технологии мойки в ремонтном подразделении сельскохозяйственного предприятия ООО «СПК Новоселки» позволило повысить степень очистки на 3,9%, сократить время цикла мойки на 25%, снизить годовые эксплуатационные затраты на 703600 руб. и уменьшить объем токсичных отходов на 96,1%.

Методы исследований. В работе использованы методы системного и сравнительного анализа, математического планирования эксперимента (симплекс-решетчатые и полные факторные планы), физико-химического анализа (гравиметрия, тензиометрия, рН-метрия), микроскопии, а также методы статистической обработки данных (регрессионный и дисперсионный анализ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Лабораторная модель конгломератного загрязнения и количественные закономерности его удаления.

2. Состав и механизм синергетического действия оптимизированной моющей композиции на основе ПАВ, щелочных бустеров, комплексонов и ингибиторов коррозии.

3. Математическая модель кинетики процесса мойки и обоснованные параметры трехстадийной технологии с рециркуляцией и регенерацией раствора.

4. Схема ресурсосберегающей мойки, обеспечивающая снижение ресурсопотребления и экологической нагрузки при высоком качестве очистки.

5. Результаты производственных испытаний, технико-экономической и экологической оценки.

Реализация результатов исследования. Результаты исследований внедрены и используются в технологических процессах ТО и ремонта автотракторной техники в ООО "СПК Новоселки" (Рязанская область, Рыбновский р-н, с. Новоселки).

Степень достоверности результатов исследования подтверждена корректным применением общепринятых методик, использованием метрологически аттестованного оборудования, статистической значимостью полученных данных (уровень значимости $p \leq 0,05$) и положительными результатами производственных испытаний.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и получили положительную оценку на международных и всероссийских конференциях: «Инновации в сельскохозяйственном машиностроении, энергосберегающие технологии и повышение эффективности использования ресурсов», «Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники» (Рязань, 2020-2024 гг.), «Перспективные направления развития автотранспортного комплекса» (Пенза, 2020), «Автомобильный транспорт: эксплуатация, сервис, подготовка кадров» (Чебоксары, 2024).

Личный вклад соискателя. Соискателем лично выполнены: анализ научной литературы, разработка методик экспериментов, синтез и оптимизация состава моющей композиции, проведение лабораторных и производственных испытаний, математическая обработка результатов, совершенствование технологической схемы мойки и технико-экономическое обоснование.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 112 наименований, в том числе 9 – на иностранном языке, и приложений. Общий объем работы составляет 191 страница машинописного текста, включает 21 рисунок и 34 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и описывается степень ее разработанности, определены цель и задачи исследования,

раскрываются методы исследований, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, основные положения диссертации, выносимые на защиту, отражены степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первой главе «Анализ современного состояния вопроса и задачи исследования» проведён анализ существующих технологий мойки деталей в АПК на современном этапе, рассмотрены и определены основные причины отложения загрязнений на деталях машин, приведены характеристики по видам загрязнений и наиболее применяемым средствам мойки, проведен анализ современных моечных установок, способов мойки, раскрыты их преимущества и недостатки.

Установлено, что основным типом загрязнений на деталях машин АПК являются конгломератные отложения, представляющие собой прочную структуру из почвенной пыли, нефтяных остатков и продуктов термоокислительного старения масел. Такие загрязнения обладают высокой адгезией и не поддаются эффективному удалению стандартными моющими средствами, особенно при низких температурах. Наиболее трудноудаляемыми являются отложения на деталях двигателя (нагары, лаки) и гидросистемы.

В настоящее время применяются химический, физико-химический, электрохимический, ультразвуковой, термический и механический способы очистки. Во всех процессах мойки и очистки используются синтетические моющие средства (СМС) типа Лабомид, МС, МЛ, Темп и другие, выпускаемые в виде сыпучего, гигроскопичного белого или светло-желтого порошка, основу которых составляют поверхностно-активные вещества (ПАВ), органические растворители, нейтральные жидкости, растворяюще-эмульгирующие средства (РЭС). Их действие основано на растворении, адсорбции, эмульгировании, диспергировании загрязнений и других процессах.

К моечным машинам с физико-химическим способом удаления загрязнений относятся машины, работающие с применением струи воды высокого давления (непрерывной, пульсирующей струей, пароводоструйная); моечные камеры (с вибрацией и без вибрации детали); погружные ванны с моющим раствором (с возбуждением жидкости с помощью колеблющейся платформы, лопастных гидравлических винтов, ультразвука и др.).

Выявлены ключевые недостатки существующих технологий: недостаточная эффективность в отношении конгломератных загрязнений, высокая ресурсоёмкость, значительное экологическое воздействие, высокая

коррозионная агрессивность по отношению к деталям и оборудованию, а также отсутствие систем рециркуляции и регенерации моющих растворов (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика способов мойки деталей

Способ мойки	Эффективность против загрязнений	Ресурсоемкость	Универсальность	Экологичность
Иммерсионный	Средняя (зависит от химического состава)	Высокая (тепло, вода, химические реагенты)	Высокая	Низкая (стоки)
Струйно-щеточный	Средняя/Высокая (для внешних поверхностей)	Средняя (вода, реагенты)	Средняя (зависит от геометрии)	Средняя (стоки, аэрозоль)
Гидродинамический	Очень высокая (для грубых отложений)	Очень высокая (вода, энергия)	Низкая (для внешних поверхностей)	Высокая (аэрозоль)
Ультразвуковой	Очень высокая (для сложных отложений)	Средняя (энергия, реагенты)	Высокая	Средняя (стоки)

На этой основе определены задачи исследования и обоснована необходимость формирования ресурсосберегающей гибридной технологии на основе оптимизированной моющей композиции с многофункциональными добавками.

Во второй главе «Методика, оборудование и материалы для проведения исследований» разработана и научно обоснована единая программа экспериментальных исследований, построенная по блочно-иерархическому принципу (рис. 1).

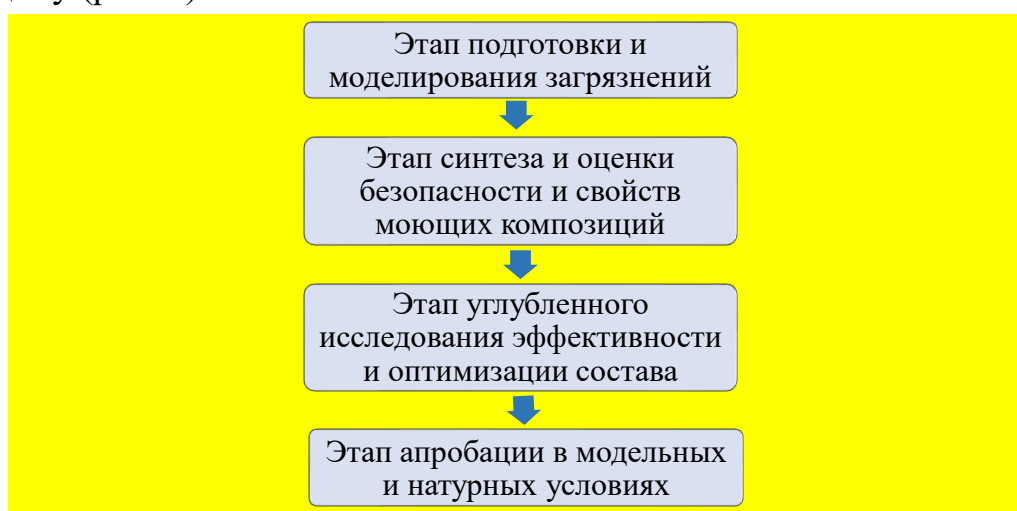


Рисунок 1 – Общая логика экспериментального исследования

Получена лабораторная модель конгломератного загрязнения в соотношении 3:1:1 и регламентирована процедура его нанесения и

термостатирования, что обеспечивает высокую воспроизводимость опытов. Обоснована трёхуровневая система оценки эффективности: гравиметрический анализ для количественной оценки степени очистки, оптическая микроскопия для визуального контроля и измерение краевого угла смачивания для оценки молекулярного взаимодействия. Предложена модернизированная лабораторная установка, позволяющая моделировать иммерсионные (с активацией и без активации раствора) и струйный режимы мойки в контролируемых условиях (рис. 2).

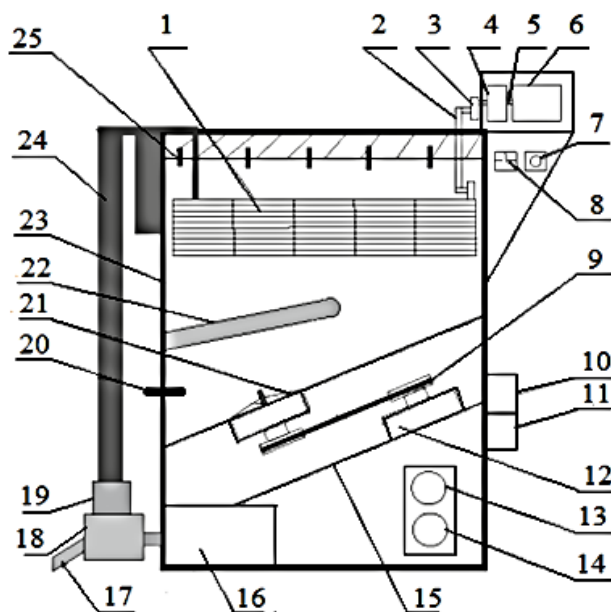


Рисунок 2 – Схема лабораторной моечной установки

Установка состоит из корзины для размещения деталей (частота колебания $0,5 \text{ с}^{-1}$) – 1; шатуна привода корзины – 2; кривошипа – 3; редуктора ФШ-10/260Е – 4; соединительной муфты – 5; двигателя КФ 160-4/56Р с номинальной мощностью 60 Вт – 6; выключателя двигателя привода КШМ – 7; выключателя двигателя привода жидкостного насоса – 8; клиноременной передачи привода центрифуги – 9; автомата общего питания на 220 В – 10; автомата выключения ТЭНа – 11; реверсивного электродвигателя ДАО с номинальной мощностью 160 Вт – 12; таймера-выключателя двигателя привода центрифуги – 13; реверс-выключателя привода центрифуги – 14; наклонной рамы – 15; двигателя привода жидкостного насоса с номинальной мощностью 80 Вт – 16; сливного крана – 17; жидкостного насоса – 18; фильтра очистки моющего раствора – 19; термометра – 20; дискового активатора моющего раствора (центрифуги) – 21; электроиндукционного нагревателя (ТЭНа) мощностью 2,0 кВт – 22; емкости установки объемом 30 л – 23; системы подачи жидкости с интервалом давления 0,2-5,0 Мпа – 24; форсунок (10 шт.) – 25.

Определена комплексная система критериев и методов оценки функциональных свойств моющих композиций, которая включает оценку технологических (пенообразование, стабильность раствора) и эксплуатационных (коррозионная активность) свойств. С использованием данной системы можно проводить объективный сравнительный анализ и выбор перспективных составов для дальнейшей оптимизации.

Выбран и адаптирован аппарат математического планирования эксперимента для решения конкретных задач исследования. Для оптимизации состава многокомпонентных смесей определен модифицированный D-оптимальный план на основе симплексной решетки, а для изучения влияния режимных параметров применен полный факторный план $N = 2^4$. Проверку значимости коэффициентов полученных математических моделей проводили по t-критерию Стьюдента, адекватности модели – по F-критерию Фишера.

В третьей главе «Исследование многофункционального моющего состава» сформирован и оптимизирован состав моющей композиции.

Методами математического планирования эксперимента (дробный факторный план 2^{4-1}) установлены количественные зависимости влияния концентрации ключевых компонентов на моющую способность, коррозионную активность и стабильность рабочего раствора.

На основе полученных математических моделей с использованием симплекс-решёточного плана была проведена многокритериальная оптимизация полученного состава с использованием функции желательности Харрингтона (рис. 3) и определена оптимальная рецептура моющего средства, включающая: синергетическую смесь ПАВ (лаурилсульфат натрия и алкоксилированный спирт, 5,5 % масс.), метасиликат натрия как щелочной бустер (7,0 %), триполифосфат натрия как комплексон (3,0 %) и тетраборфосфат калия как ингибитор коррозии (1,2 %).

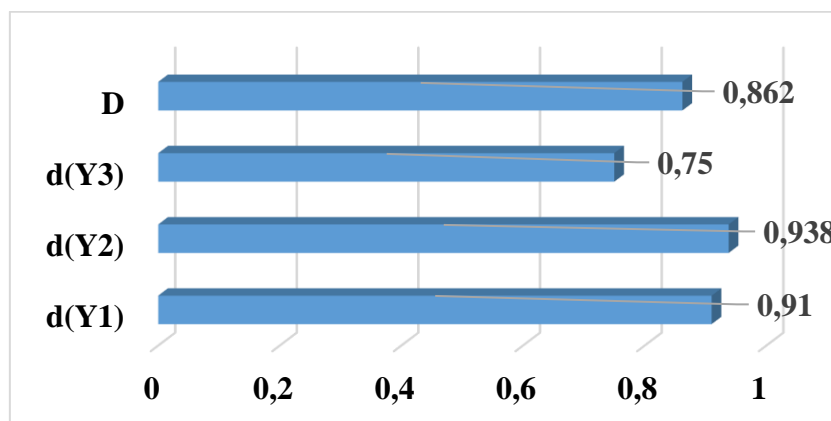


Рисунок 3 – Частные функции ($d(Y_1)$, $d(Y_2)$, $d(Y_3)$) и обобщенный показатель желательности (D)

Для всесторонней оценки качества оптимизированного состава было проведено определение основных физико-химических и функциональных свойств его 2%-го водного раствора:

- равновесного поверхностного натяжения (29,8 мН/м);
- значения водородного показателя (рН = 11,6 при температуре 20°С);
- моющей способности (91,8 %);
- коррозионной активности (для стали Ст3 0,052 г/м²·ч, для алюминиевого сплава АЛ4 – 0,018 г/м²·ч);
- стабильности (оценка 4,6 по 5-балльной шкале);
- пенообразования (стойкость пены – 25 с);
- температурной эффективности – экспериментально подтверждено, что данная композиция обеспечивает моющую способность 94,6 % при температуре 50°С, сохраняет эффективность выше 85 % даже при снижении температуры до 40°С и превосходит аналоги по моющей способности в низкотемпературной области (40°С) в 2 раза при значительно более низкой коррозионной активности (табл. 2), что позволяет существенно снизить энергозатраты.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики моющих составов

Параметр	Оптимизированная рецептура	Лабомид-203	МС-8
Моющая способность при 50°С, %	94,6	56,2	58,8
Моющая способность при 40°С, %	85,4	40,55	39,1
Скорость коррозии Ст3, г/м ² ·ч	0,052	0,095	0,210
рН (2%-й раствор)	11,6	12,8	12,2
Поверхностное натяжение, мН/м	29,8	38,2	35,5

Таким образом, в результате проведенных исследований сформирована и всесторонне охарактеризована моющая композиция, сочетающая высокую функциональную эффективность в низких температурных условиях с незначительным коррозионным воздействием на материалы.

В четвертой главе «Исследование процесса мойки. Обоснование параметров ресурсосберегающей технологии» исследована кинетика процесса мойки и сформирована технологическая схема мойки. Установлено, что критическая концентрация моющего средства, обеспечивающая максимальную эффективность, составляет 3% (рис. 4).

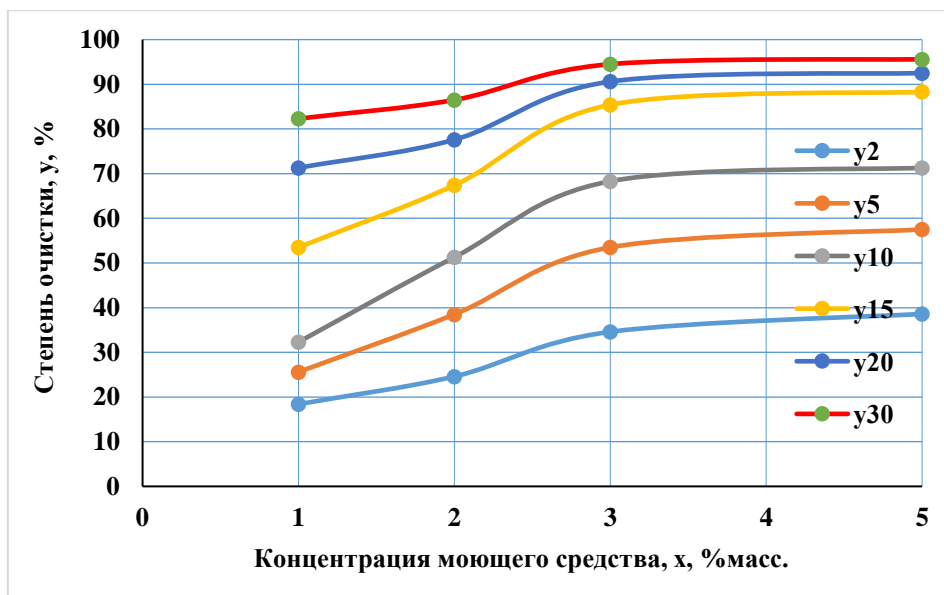


Рисунок 4 – Влияние концентрации моющего средства на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при температуре раствора 50°C: y_2 – степень очистки через 2 мин. мойки; y_5 – степень очистки через 5 мин. мойки; y_{10} – степень очистки через 10 мин. мойки; y_{15} – степень очистки через 15 мин. мойки; y_{20} – степень очистки через 20 мин. мойки; y_{30} – степень очистки через 30 мин. мойки

Расчёт энергии активации процесса по уравнению Аррениуса (рис. 5) дал значение 25,7 кДж/моль, что указывает на низкую функциональную зависимость оптимизированного состава от ключевых эксплуатационных параметров – температуры рабочего раствора и интенсивности механического воздействия на загрязняющий субстрат. Основной механизм его действия и стабильно высокая эффективность обусловлены факторами, заложенными на уровне его рецептуры, что подтверждает возможность проведения эффективной мойки при умеренных температурах.

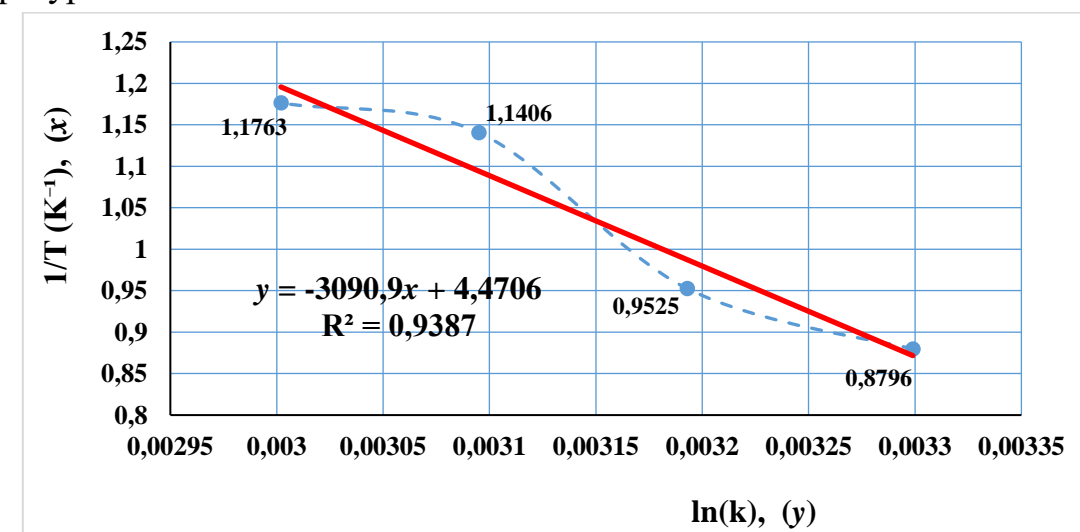


Рисунок 5 – График Аррениуса для процесса мойки

Исследование гидродинамических режимов показало, что наилучший результат 98,2 % степени очистки достигается при использовании трёхстадийного режима: первая стадия (5 мин) – иммерсионная без перемешивания для разрыхления загрязнения; вторая (5 мин) – иммерсионная с перемешиванием для разрушения адгезионно-когезионных связей загрязнения; третья (5 мин) – струйная обработка (0,3 МПа) для окончательного удаления остатков загрязнения (рис. 6).

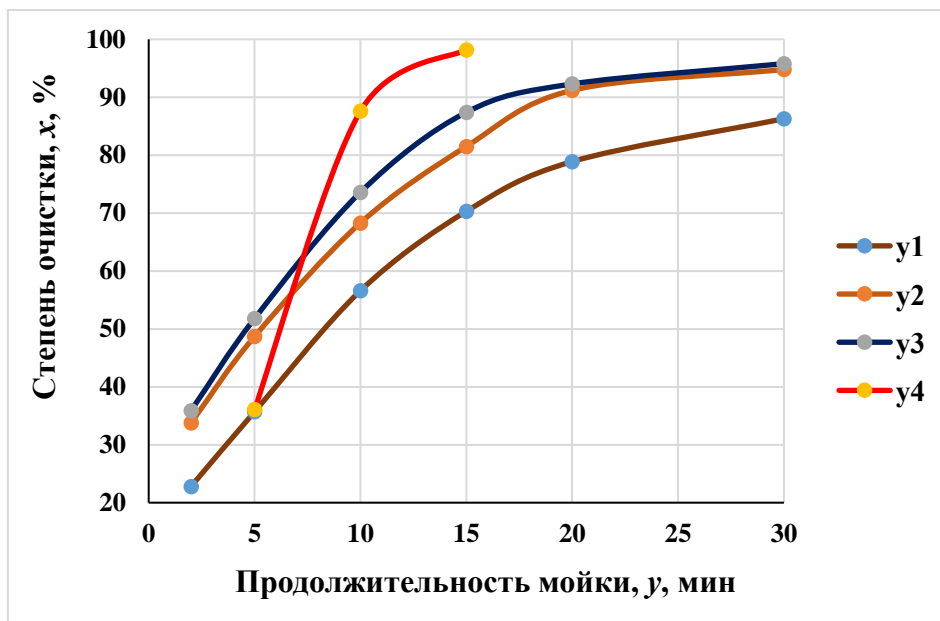


Рисунок 6 – Кинетические кривые для различных гидродинамических режимов мойки при температуре раствора 50°C и концентрации оптимизированного состава 3% масс.: **y1** – иммерсионный без перемешивания; **y2** – иммерсионный с перемешиванием; **y3** – струйный режим; **y4** – комбинированный режим

Методом математического планирования эксперимента (полный факторный план $N = 2^4$) получена и верифицирована математическая модель, описывающая процесс удаления конгломератных загрязнений с учетом основных технологических параметров.

$$y = 23,54 + 14,28 x_1 + 5,39 x_2 + 9,89 x_3 + 8,28 x_4 + 7,85 x_1 x_2 - 2,3 x_1 x_3 + 2,79 x_1 x_4 + 1,81 x_2 x_3 - 1,45 x_2 x_4 + 0,73 x_3 x_4 + 0,95 x_1 x_2 x_3 - 1,06 x_1 x_2 x_4 - 1,18 x_2 x_3 x_4,$$

где x_1 и x_2 – концентрации ПАВ и ТБФК соответственно, % масс;

x_3 – температура раствора, °C;

x_4 – продолжительность мойки, мин.

Полученное уравнение регрессии подтверждено статистическим анализом (F-критерий Фишера).

На рис. 7 приведена диаграмма влияния отдельных параметров мойки и их взаимодействий на повышение степени очистки деталей.

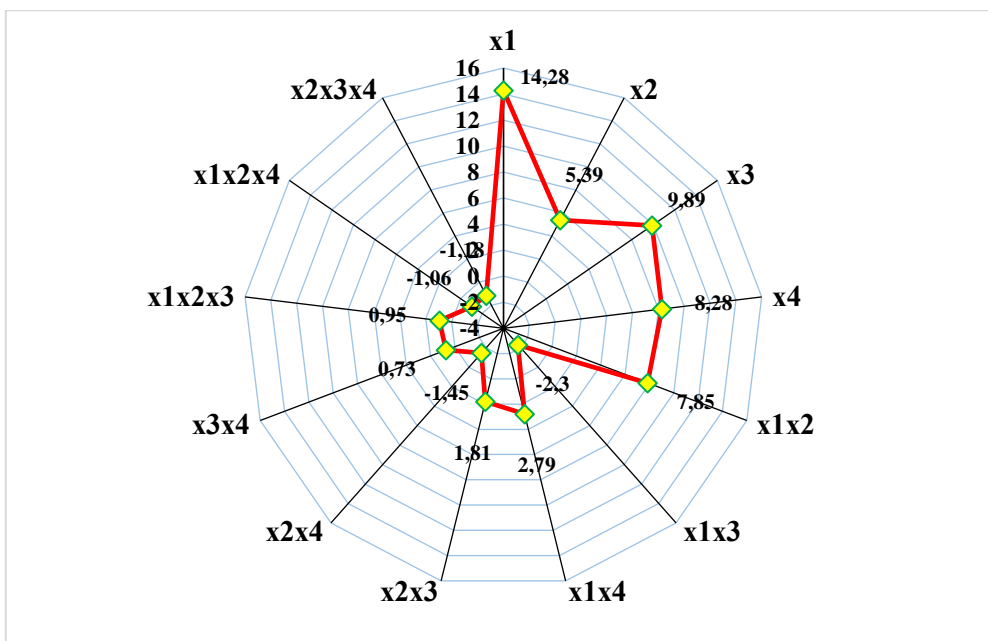


Рисунок 7 – Влияние отдельных параметров мойки и их взаимодействий на повышение степени очистки деталей

Из модели и рис. 7 отчетливо видно, что из всех многофакторных взаимодействий только взаимодействие ПАВ-ТБФК (x_1x_2) проявляет синергетические свойства в сформированной технологии мойки, что подчеркивает многофункциональность ТБФК и делает их совместное применение наиболее выгодным для повышения степени очистки.

Показана возможность регенерации моющего раствора путем отстаивания и последовательной фильтрации надосадочного раствора (сетчатый фильтр 100 мкм – полипропиленовые картриджные фильтры 10 мкм – 1 мкм), что позволяет использовать его до 25 циклов без замены (критический предел снижения моющей способности ниже 75% от первоначального уровня) (рис. 8).

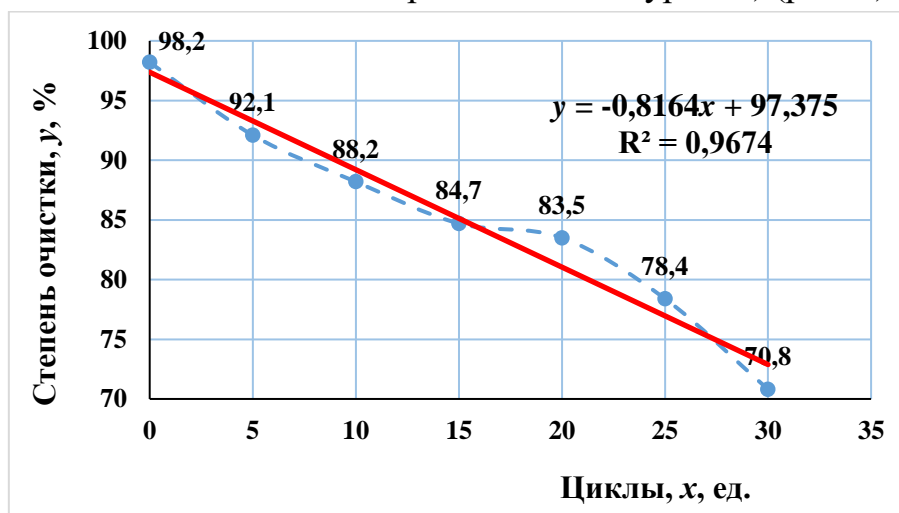


Рисунок 8 – Изменение эффективности регенерации раствора по циклам мойки

Таким образом, в результате проведенных исследований обоснованы параметры и сформирована ресурсосберегающая технология мойки деталей машин АПК, включающая оптимальные параметры процесса и принципиальную схему из трех стадий мойки (иммерсионная без перемешивания, иммерсионная с перемешиванием, струйная обработка), а также рециркуляцию и регенерацию рабочего раствора, что обеспечивает возможность снижения удельного расхода воды, моющего средства и энергозатрат по сравнению с традиционными схемами.

В пятой главе «Оценка эффективности сформированной ресурсосберегающей технологии мойки» представлены результаты производственных испытаний и технико-экономический анализ результатов работы. Испытания на базе ремонтного подразделения ООО «СПК Новоселки» проводились на партии из 215 деталей (15 наименований, масса партии около 1 тонны). Сравнение с базовой технологией показало статистически значимое повышение степени очистки с 81,9 % до 85,8 % при одновременном сокращении времени мойки с 20 до 15 минут (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты сравнения моющей способности по существующей и сформированной технологиям

Температура раствора, °С	Средняя условная степень очистки по циклам, %					Средняя условная степень очистки по 25 процессам мойки, %
	5	10	15	20	25	
мойка по существующей технологии						
80-85	82,3	81,7	82,4	81,2	82,0	81,9
40-50	48,7	48,2	49,1	48,5	48,6	48,6
мойка по сформированной технологии						
40-50	92,3	88,5	85,4	84,2	78,8	85,8

Расчет ресурсосберегающего эффекта подтвердил значительное снижение материало- и энергоемкости процесса. Годовая экономия при объеме мойки деталей 50 тонн составляет: воды на 71,55 м³ (95,4 %), моющего средства – на сумму 403020 руб. (99,6 %), тепловой энергии – на 3421 кВт·ч (54,2 %), электроэнергии – 82 кВт·ч (62,1%).

Общий годовой экономический эффект составил 703600 рублей (табл. 4).

Таблица 4 – Сводные показатели экономии ресурсов и затрат

Вид ресурса	Базовая технология	Испытываемая технология	Абсолютная экономия	Годовая экономия, руб.
Вода, м ³ /год	75,0	3,45	71,55	3219,75
Моющее средство,	2250,0	9,0	–	403020,0

Вид ресурса	Базовая технология	Испытываемая технология	Абсолютная экономия	Годовая экономия, руб.
кг/год				
Тепловая энергия, кВт·ч/год	6316,0	2895,0	3421,0	16010,28
Электроэнергия, кВт·ч/год	132,0	50,0	82,0	383,76 234,0
Утилизация жидких отходов, м ³ /год	75,0	3,0	72,0	252000,0
Утилизация твердых отходов, м ³ /год	7,0	0,27	6,73	28266
Годовой экономический эффект, руб.				703600,0

Оценка экологического эффекта показала кардинальное снижение нагрузки на окружающую среду. Внедрение технологии позволило полностью исключить сброс сточных вод в канализацию (снижение на 100%) и сократить объем образования токсичных отходов на 96,1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ и идентифицированы морфологический состав и физико-химические свойства типовых загрязнений деталей основных агрегатов машин АПК. Установлено, что преобладающей формой загрязнений являются многокомпонентные отложения, обладающие высокой адгезионной прочностью. Получена лабораторная модель загрязнения (минеральная : нефтяная : связующая = 3 : 1 : 1), обеспечивающая воспроизводимость экспериментальных исследований и достоверность результатов.

2. Синтезирован лабораторный образец моющей композиции с многофункциональными добавками, адаптированный для удаления выявленного спектра загрязнений. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден его синергетический эффект. Установлено, что оптимальное сочетание неионогенных ПАВ и анионных ПАВ в соотношении 3:1 в моющей композиции снижает критический коэффициент мицеллообразования на 35% и равновесное поверхностное натяжение раствора до 29,8 мН/м. Композиция демонстрирует эффективность при пониженных температурах (40-50°С), обеспечивая моющую способность 98,2-78,8% в зависимости от количества регенерации раствора.

3. Проведена оценка функциональных свойств синтезированной моющей композиции с использованием сформированной и обоснованной трёхуровневой системы контроля эффективности: гравиметрической,

визуально-инструментальной (оптической микроскопии) и молекулярной (краевого угла смачивания). Показано, что предложенная композиция обеспечивает степень очистки до 98,2%, снижение коррозионной активности стали Ст3 до 0,052 г/м²·ч, алюминиевого сплава АЛ4 – до 0,018 г/м²·ч и относится к 4-му классу опасности (малоопасные вещества).

4. Исследовано влияние параметров на эффективность процесса мойки. Получена математическая модель, адекватно описывающая экспериментальные данные, которая учитывает влияние концентрации ПАВ, многофункциональной добавки ТБФК, температуры и продолжительности мойки. Энергия активации процесса составляет 25,7 кДж/моль, что подтверждает низкую температурную зависимость эффективности сформированной моющей композиции, которая реализуется преимущественно за счет химико-физической рецептуры, что минимизирует потребность в энергозатратных внешних усилителях процесса мойки.

5. Обоснованы параметры ресурсосберегающей мойки, обеспечивающей снижение удельного расхода воды на 86,3% (до 2,3 л/кг), моющих средств на 75,6% (до 14,2 г/кг), энергозатрат на 55,4% (до 0,41 кВт·ч/кг), с системой рециркуляции и регенерации растворов, позволяющей организовать до 25 циклов использования моющего раствора. Предложены рекомендации по организации рециркуляции и регенерации растворов.

6. Выполнены технико-экономическая и экологическая оценки эффективности усовершенствованной технологии мойки. Ее внедрение в ремонтное подразделение ООО «СПК Новоселки» Рыбновского района Рязанской области (с. Новоселки) в сравнении с базовой технологией позволило повысить степень очистки на 3,9%, сократить время цикла мойки на 25,0%, с учетом времени подогрева раствора на 46,1%, увеличить пропускную способность на 60,0%, снизить расход воды на 95,4%, моющих средств – на 99,6%, тепловой энергии – на 54,2%, электроэнергии – на 62,1%. Годовой экономический эффект составляет 703600 рублей. Установлен значительный экологический эффект от внедрения технологии, включающий полное исключение сброса сточных вод, сокращение объема токсичных отходов на 96,1%. Сформированная моющая композиция относится к 4-му классу опасности (малоопасные вещества) и не содержит токсичных тяжелых металлов и летучих органических соединений. Годовой предотвращенный экологический ущерб оценивается в 280266 рублей.

Рекомендации производству

На основании результатов проведённых исследований и производственных испытаний на базе ООО «СПК Новоселки» разработаны следующие рекомендации для внедрения в ремонтные подразделения предприятий агропромышленного комплекса:

1. Внедрить сформированную ресурсосберегающую технологию трёхстадийной мойки с использованием оптимизированной моющей композиции на основе синергетической смеси ПАВ и ингибитора коррозии (тетраборфосфат калия). Данная технология обеспечивает степень очистки до 85,8 % при сокращении времени цикла на 25 % (с 20 до 15 мин).

2. Организовать замкнутый цикл рециркуляции моющего раствора с применением комбинированной регенерации: отстаивание + фильтрация (100 мкм – 10 мкм – 1 мкм), что позволяет использовать один и тот же раствор до 25 циклов без значимой потери эффективности, исключить сброс сточных вод в канализацию и снизить объём токсичных отходов на 96,1 %.

3. Снизить рабочую температуру мойки до 40-50°C за счёт применения многофункциональной композиции, что обеспечит снижение потребления тепловой энергии на 54,2 % и уменьшит термическую нагрузку на оборудование и персонал.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Исследование биоразлагаемости компонентов сформированной композиции и их влияния на микрофлору локальных очистных сооружений, что позволит создать полностью «зелёную» технологию мойки.

2. Разработка мобильных моечных установок на базе тракторов или автоприцепов, оснащённых системой рециркуляции, для проведения полевых ремонтов с минимальным воздействием на окружающую среду.

Положения диссертации и полученные результаты отражены в следующих основных публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России

1. Казарин А.С. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники / И. А. Успенский, И. В. Фадеев, Л. Ш. Пестряева, Ш.В. Садетдинов, А.С. Казарин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 3(59). – С. 365-376.

2. Казарин А.С. Зависимость степени очистки поверхностей деталей агрегатов автотракторной техники от продолжительности мойки с активацией

моющего раствора центрифугой / И.В. Фадеев, Е.И. Степанова, А.С. Казарин, В.П. Воронов // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 130-138.

В патентах и свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ:

3. Патент № 2777442 С1 Российская Федерация, МПК С11D 1/72, С11D 1/02, С11D 3/06. Средство для мойки деталей транспортных средств : № 2021130520 : заявл. 19.10.2021 : опубл. 03.08.2022 / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, Е.И. Степанова, А.Н. Ременцов, Е.В. Митрохина, А.С. Казарин, В.П. Воронов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева».

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665017 Российская Федерация. Оценка эффективности мойки деталей автотракторной техники : № 2022664362 : заявл. 29.07.2022 : опубл. 09.08.2022 / А. В. Шемякин, С. Н. Борычев, И. А. Успенский [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева».

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №1696

подписано в печать 15.04.2026 г.

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Рязанский государственный агротехнологический университет имени

П. А. Костычева»

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1

Отпечатано в издательстве учебной литературы

и учебно-методических пособий ФГБОУ ВО РГАТУ

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1