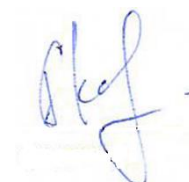


Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический
университет имени П.А. Костычева»

На правах рукописи



КАЗАРИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОЙКИ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор И. В. Фадеев

Рязань – 2026

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена формированию ресурсосберегающей технологии мойки деталей машин агропромышленного комплекса (АПК). Актуальность обусловлена необходимостью снижения эксплуатационных затрат, экологической нагрузки и повышения эффективности ремонтных процессов.

Сформулирована цель работы – обоснование параметров ресурсосберегающей мойки деталей машин АПК.

Описаны использованные методы: математическое планирование эксперимента, гравиметрический и тензиометрический анализ, микроскопия, статистическая обработка данных. Особое внимание уделено изложению научной новизны, заключающейся в установлении количественных закономерностей формирования и удаления конгломератных загрязнений, подтверждении синергетического эффекта многофункциональной моющей композиции, получении математической модели процесса мойки, научном обосновании трехстадийной схемы мойки с системой рециркуляции и регенерации, обеспечивающей до 25 циклов использования моющего раствора. Подчеркнуты теоретическая и практическая значимости работы: обоснованы параметры ресурсосберегающей мойки деталей, создана адекватная математическая модель процесса мойки и сформирована трехстадийная технологическая схема мойки, позволяющая сократить расход воды, реагентов и электроэнергии.

На защиту выносятся ключевые положения: лабораторная модель загрязнения деталей, рецептура многофункциональной моющей композиции, математическая модель кинетики процесса мойки, схема ресурсосберегающей мойки с рециркуляцией и регенерацией раствора, результаты производственных испытаний, подтверждающие технико-экономическую и экологическую эффективность.

В первой главе проведен анализ существующих технологий, оборудования и моющих средств, а также классифицированы загрязнения деталей с учетом их

морфологии и физико-химических свойств.

Вторая глава раскрывает теоретические основы повышения эффективности очистки и защиты от коррозии. Рассмотрены механизмы смачивания, эмульгирования, пептизации и роль ингибиторных добавок.

В третьей главе описаны методики лабораторных и производственных исследований: получена лабораторная модель загрязнения (минеральная : нефтяная : связующая = 3:1:1); определены подходы к оценке моющей способности, коррозионной активности и стабильности растворов.

В четвертой главе установлена оптимальная рецептура раствора (синергетическая смесь ПАВ Н-1:А-2 = 3:1 с добавкой тетраборфосфата калия) и параметры процесса: температура 40-50°C, трехстадийный режим (иммерсионная мойка без перемешивания, с перемешиванием и струйная обработка). Построена адекватная математическая модель процесса (энергия активации 25,7 кДж/моль), подтверждающая его низкую температурную чувствительность.

Пятая глава содержит результаты производственных испытаний на базе ООО «СПК Новоселки» и их экономическое обоснование. Внедрение технологии обеспечило: повышение степени очистки на 3,9%; сокращение времени цикла мойки на 25%; снижение годовых эксплуатационных затрат на 703,6 тыс. рублей (при объеме 50 т деталей в год); уменьшение образования токсичных отходов на 96,1% и полное исключение сброса сточных вод за счет рециркуляции раствора.

Достоверность результатов подтверждена корректным применением методов, статистической значимостью данных ($p \leq 0,05$) и положительными результатами производственной апробации.

Работа изложена на 191 странице, включает 21 рисунок, 34 таблицы и список из 112 источников. Результаты внедрены в ремонтном подразделении ООО «СПК Новоселки» (акт внедрения прилагается).

Приложения содержат результаты выполненных научных исследований и материалы, подтверждающие их внедрение в производственный процесс.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Классификация и характеристика загрязнений деталей машин агропромышленного комплекса	11
1.2 Обзор и сравнительный анализ существующих способов мойки деталей ...	16
1.3 Анализ современных моющих средств и применяемых добавок. Их достоинства и недостатки.....	22
1.4 Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в процессах мойки	27
1.5 Постановка цели и задач исследования	32
1.6 Выводы по главе 1 и обоснование направления исследований.....	34
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	37
2.1 Общая методика и программа экспериментальных исследований	37
2.2 Характеристика объектов исследования	40
2.3 Методы и приборы для анализа загрязнений и оценки чистоты поверхности	43
2.4 Методы оценки эффективности моющего состава	45
2.5 Описание лабораторной установки для моделирования процесса мойки	48
2.6 Методы математического планирования эксперимента и статистической обработки данных	50
2.7 Выводы по главе 2	52
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОЮЩЕГО СОСТАВА	54
3.1 Теоретические предпосылки подбора компонентов моющего состава	54
3.2 Синтез и подбор многофункциональных добавок	58

3.3 Исследование влияния компонентов на моющие и защитные свойства композиции	62
3.4 Оптимизация рецептуры моющего средства и установление его физико-химических свойств	70
3.5 Выводы по главе 3	85
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОЙКИ. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ	87
4.1 Исследование кинетики процесса мойки в зависимости от концентрации моющего средства, температуры и гидродинамического режима.....	87
4.2 Разработка математической модели процесса мойки, адекватно описывающей экспериментальные данные	96
4.3 Исследование возможности регенерации и многократного использования моющего раствора	104
4.4 Обоснование и создание принципиальной технологической схемы моечного процесса	112
4.5 Выводы по главе 4	116
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СФОРМИРОВАННОЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ МОЙКИ	118
5.1 Результаты производственных испытаний ресурсосберегающей технологии и моющего состава	118
5.2 Расчет экономии воды, моющих средств, энергии и снижения затрат	122
5.3 Выводы по главе 5	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	137
ПРИЛОЖЕНИЯ	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Совершенствование и повышение эффективности технологии мойки деталей машин АПК является важным фактором обеспечения надежности, долговечности и ремонтпригодности машинно-тракторного парка [1, 28, 29, 30, 31, 39, 41, 69, 99, 100]. 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 [53, 59, 64, 98]. Традиционные методы мойки, основанные на использовании высокотемпературных моющих растворов и одноразовом водопотреблении, характеризуются значительной ресурсоемкостью и формированием сложных по составу сточных вод [6, 7, 42, 46]. 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

технологии 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, pH-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.

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Классификация и характеристика загрязнений деталей машин агропромышленного комплекса

Эксплуатационная надежность и межремонтный ресурс машин АПК в значительной степени определяются эффективностью операций технического обслуживания и ремонта, ключевым элементом которых является процесс мойки деталей [5, 38, 43, 51, 52]. Особую сложность представляет очистка деталей основных агрегатов – двигателя, коробки передач (КПП), заднего моста, гидравлической системы и других узлов, работающих в условиях интенсивных механических и тепловых нагрузок [55, 56, 62, 66]. Формирование загрязнений на поверхностях деталей этих агрегатов представляет собой сложный физико-химический процесс, обусловленный спецификой их функционирования и контакта с эксплуатационными материалами и внешней средой. Всестороннее исследование природы, состава и свойств этих загрязнений является фундаментальной предпосылкой для разработки высокоэффективных и ресурсосберегающих моющих технологий, адаптированных для конкретных типов агрегатов.

Классификация загрязнений деталей машин АПК требует комплексного подхода, учитывающего как природу происхождения отложений, так и специфику узла, в котором они формируются. Наиболее существенной с технологической точки зрения представляется классификация по типу агрегата и доминирующему механизму образования отложений, поскольку именно эти факторы определяют морфологический состав и, следовательно, стратегию удаления загрязнений.

Загрязнения деталей двигателя характеризуются наибольшим разнообразием и сложностью состава, что обусловлено сочетанием высоких температур, давления и наличия продуктов сгорания топлива. Среди них выделяют [25, 26, 40, 71]:

– нагары – твердые углистые отложения, образующиеся в камере сгорания, на поршнях, клапанах и в выпускном тракте в результате пиролиза и неполного сгорания топлива. Представляют собой сложную композицию аморфного углерода (до 80-85%), смолистых веществ, соединений серы, свинца (при использовании этилированного бензина) и металлосодержащих зольных элементов (из присадок к маслу и топливу). Нагары обладают высокой пористостью, адгезионной прочностью и низкой теплопроводностью, что негативно влияет на рабочие процессы двигателя [77];

– лаки – пленочные отложения на боковых поверхностях поршней, поршневых кольцах, стержнях клапанов и других горячих деталях. Образуются в результате полимеризации и окисления моторного масла под воздействием высоких температур (180-300°C). Имеют гладкую, твердую поверхность, от желтого до темно-коричневого цвета. Их основу составляют высокомолекулярные кислородсодержащие соединения (карбены, карбоиды, асфальтены). Адгезия лаков к металлу очень высока, что делает их одними из самых трудноудаляемых загрязнений;

– шламы (осадки) – мазеобразные или пастообразные отложения в картере двигателя, масляных каналах и на деталях, не подвергающихся высокому нагреву. Формируются в результате окисления масла, его загрязнения продуктами износа (металлическая пыль), водой, топливом и антифризом. Различают низко- и высокотемпературные шламы. В их состав входят карбонильные соединения, смолы, карбены, асфальтены, а также вода, пыль и механические примеси. Шламы способны закоксовывать масляные каналы и ухудшать смазку трущихся пар;

– обычные масляно-грязевые отложения на внешних поверхностях двигателя (блок, головка блока, поддон картера), представляющие собой смесь пыли, почвы и подтекающего моторного масла, спекающуюся в прочный конгломерат под воздействием тепла.

Загрязнения деталей трансмиссии (КПП, задний мост, раздаточная коробка) имеют свою специфику, обусловленную более низкими, по сравнению

с двигателем, температурными режимами, но высокими удельными давлениями в зонах контакта деталей (шестерни, подшипники, муфты) [82, 88].

Основным видом загрязнений являются отработавшие трансмиссионные масла и продукты их старения. В процессе эксплуатации масло подвергается механическому и окислительному старению, загрязняется продуктами износа (частицы металла, фрикционного материала), а также водой, конденсирующейся при перепадах температур [96, 105].

Характерным для зубчатых зацеплений является образование противоизносных и противозадирных отложений, состоящих из продуктов модификации поверхности (сульфиды, фосфиды железа), образующихся при работе серо- и фосфорсодержащих присадок (например, диалкилдитиофосфата цинка) [87].

На внешних поверхностях агрегатов трансмиссии формируются конгломератные отложения из почвы, растительных остатков, дорожной пыли и подтекающего трансмиссионного масла. Эти отложения, как правило, менее спечены, чем на двигателе, но обладают высокой абразивностью, что опасно для уплотнительных элементов [85].

Загрязнения деталей гидравлической системы (гидроцилиндры, распределители, насосы, трубопроводы) отличаются высокой дисперсностью и специфическим составом [27, 61, 95].

Внутренние загрязнения – это, в первую очередь, продукты износа и старения рабочей жидкости (частицы металла, эластомера уплотнений, смолы). Особую опасность представляют отложения лакообразного типа на золотниках и плунжерах, нарушающие точность работы гидроаппаратуры.

Внешние загрязнения представляют собой смесь гидравлической жидкости с почвой и пылью. Из-за высокой проникающей способности гидравлических масел эти отложения глубоко проникают в зазоры и труднодоступные полости.

С технологической точки зрения, для выбора стратегии мойки критически важна классификация загрязнений по характеру связи с поверхностью и физико-химическим свойствам, единая для всех типов агрегатов.

Механические (слабосвязанные) загрязнения удерживаются на поверхности преимущественно силами Ван-дер-Ваальса и механическим зацеплением за микронеровности. К ним относятся пыль, непрочно связанная земля, сухие растительные остатки на внешних поверхностях агрегатов. Энергия связи таких отложений не превышает 0,1-1 кДж/моль.

Физико-химические (прочносвязанные) загрязнения образуют с поверхностью адгезионные связи значительной энергии (10-100 кДж/моль). К этой группе относятся [18]:

- адсорбционные слои масел и рабочих жидкостей, где полярные молекулы присадок и продукты окисления образуют ориентированные слои на границе раздела фаз;

- полимеризованные пленки (лаки, нагары), удерживаемые за счет химической адсорбции и диффузии в поверхностный слой металла;

- высокодисперсные коллоидные системы (шламы), коагулировавшие на поверхности.

Химические загрязнения включают продукты коррозии металлов (оксиды, гидроксиды железа, алюминия) [49, 50], а также отложения, образующиеся в результате химических реакций присадок с материалом детали (например, сульфидные пленки на зубьях шестерен). Они образуют прочно связанные с основным металлом слои [11].

Структурно-механические характеристики загрязнений различных агрегатов варьируются в чрезвычайно широких пределах:

- предел динамического сдвига (τ_0 , Па) – для свежих масел близок к нулю, для застарелых шламов в картере двигателя составляет 50-200 Па, для спекшихся масляно-грязевых отложений на внешних поверхностях – 200-800 Па, а для нагаров и лаков может превышать 1000-1500 Па;

- адгезионная прочность (σ , Н/м²) – для масляных пленок составляет 0,1-1·10⁴ Н/м², для конгломератных отложений – 0,5-5·10⁴ Н/м², для лаков и нагаров может достигать 1·10⁵ Н/м² и более;

- твердость и абразивность – минеральные частицы в конгломератных

отложениях (окислы кремния, алюминия) имеют высокую твердость и являются причиной абразивного износа при попадании внутрь агрегатов.

На рисунке 1.1 представлена диаграмма, иллюстрирующая взаимосвязь между типом агрегата, структурной прочностью отложений и энергией, необходимой для их удаления [112].

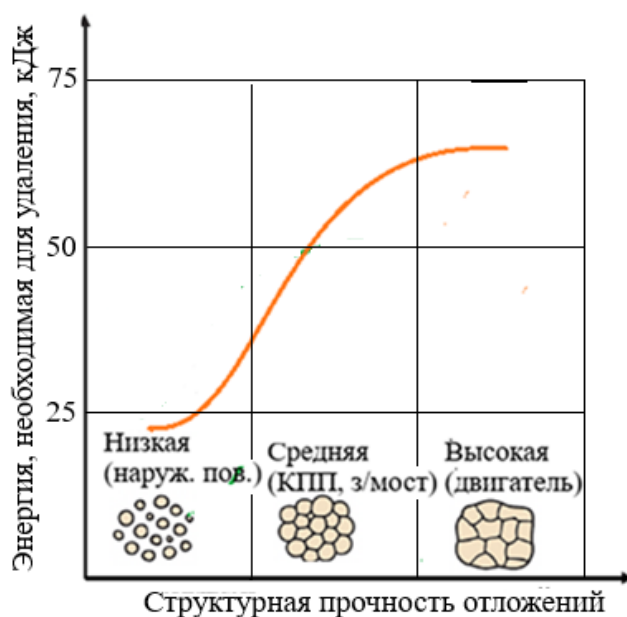


Рисунок 1.1 – Взаимосвязь между типом агрегата, структурной прочностью отложений и энергией, необходимой для их удаления

Из рисунка 1.1 видно, что внутренние отложения двигателя (нагары, лаки) занимают область максимальных значений, тогда как внешние отложения трансмиссии и гидросистемы, хотя и обладают высокой прочностью, требуют меньших энергозатрат за счет возможности применения более интенсивных механических способов очистки.

Характер и состав загрязнений существенно зависят от режимов работы агрегатов и типа применяемых смазочных материалов и топлива [17]:

- двигатели, работающие в режимах частых остановок-пусков и при неполном прогреве, более склонны к образованию низкотемпературных шламов и смолистых отложений;

- агрегаты, работающие с высоконагруженными гипоидными передачами (задний мост), формируют специфические серо-фосфорсодержащие отложения;

- использование биодизельного топлива может приводить к образованию мыльных осадков в двигателе и топливной системе из-за омыления жирных кислот;
- попадание охлаждающей жидкости (антифриза) в масло двигателя приводит к образованию эмульсионных отложений и ускоряет процесс окисления.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы, имеющие значение для формирования ресурсосберегающей технологии мойки деталей:

1. Загрязнения различных агрегатов (двигатель, КПП, задний мост, гидро-система) имеют четко выраженную специфику по составу, морфологии и физико-химическим свойствам, что требует дифференцированного подхода к их очистке.

2. Наиболее трудноудаляемыми являются внутренние отложения двигателя (нагары, лаки) и гидросистемы, обладающие максимальной адгезионной прочностью и сложным химическим составом.

3. Эффективный моющий состав для агрегатов должен обеспечивать многостадийное и целенаправленное воздействие: растворение и пептизацию углеводородной матрицы; диспергирование твердых частиц; разрушение полимеризованных смолисто-лаковых пленок; нейтрализацию и диспергирование кислых продуктов старения масел; ингибирование коррозии очищенной поверхности.

4. Универсальный моющий раствор для всех типов агрегатов должен представлять собой композицию многофункциональных добавок, синергетически действующих на различные типы отложений, – ПАВ, растворителей, комплексообразователей, щелочных бустеров и ингибиторов коррозии.

Этот вывод обуславливает необходимость детального исследования рецептур моющих средств с многофункциональными добавками, адаптированных для комплексной очистки деталей машин АПК, что и будет предметом дальнейшего исследования в данной работе.

1.2 Обзор и сравнительный анализ существующих способов мойки деталей

Выбор оптимального способа очистки деталей машин АПК является критически важным этапом технологического процесса ремонта и обслуживания

[68]. Существующие методы мойки основаны на различных физико-химических принципах и характеризуются различной эффективностью, ресурсоемкостью и экологическим воздействием [10]. Проведение сравнительного анализа этих методов позволяет выявить их преимущества и недостатки применительно к очистке деталей с специфическими загрязнениями, описанными в предыдущем разделе, и обосновать направление разработки ресурсосберегающей технологии.

Наиболее традиционным и распространенным методом является мойка деталей в моющих растворах, которая может осуществляться как путем полного погружения (иммерсионный способ), так и в специализированных моечных камерах с орошением. Физико-химической основой данного метода является комплекс процессов, инициируемых действием моющей среды: смачивание, эмульгирование, солубилизация, пептизация и диспергирование загрязнений [9, 16].

Иммерсионный способ предполагает погружение деталей в ванну с нагретым моющим раствором, часто при механическом или пневматическом перемешивании. Его эффективность определяется, в первую очередь, химическим составом моющего раствора, температурой и продолжительностью процесса [43, 44]. Ключевым преимуществом является возможность обработки деталей сложной конфигурации и внутренних полостей, куда проникает раствор. Однако методу присущи существенные недостатки: высокий расход тепловой энергии на поддержание температуры раствора (60-95°C), значительный расход моющих средств, постепенное загрязнение ванны и снижение моющей способности раствора, а также необходимость последующей промывки деталей чистой водой для удаления остатков щелочных композиций [45].

Камерная мойка с орошением (струйная) осуществляется в замкнутых камерах, где на детали под давлением 0,2-0,6 МПа подаются струи моющего раствора через систему форсунок. Часто процесс сочетается с механическим воздействием вращающихся щеток. Данный способ менее требователен к объему моющего раствора и позволяет организовать его рециркуляцию и фильтрацию. Однако его эффективность сильно зависит от геометрии детали и расположения форсунок; зоны, экранированные от прямого воздействия струй, очищаются

плохо [48]. Кроме того, щетки могут быть неприменимы для очистки прецизионных поверхностей и сложных рельефов.

Общим для методов, основанных на моющих растворах, является их высокая зависимость от качества и состава моющей среды. Традиционные щелочные составы, эффективные против жиров и масел, часто не справляются с полимеризованными отложениями (лаками, нагарами) и могут вызывать коррозию цветных металлов и алюминиевых сплавов, широко применяемых в современных агрегатах. Это обуславливает необходимость разработки новых рецептур с многофункциональными добавками, сочетающих моющую активность с защитными и ингибирующими свойствами.

Гидродинамические методы основаны на использовании кинетической энергии высокоскоростной струи жидкости для разрушения и отрыва загрязнений от поверхности. Эффективность очистки в данном случае определяется не столько химическим воздействием, сколько гидродинамическими параметрами: давлением, расходом, формой и структурой струи [58, 80].

Различают струйную мойку (давление до 70 МПа) и гидроабразивную мойку (с добавлением в поток жидкости абразивных частиц). Струйные методы высокоэффективны для удаления прочносвязанных конгломератных загрязнений с внешних поверхностей агрегатов – поддонов картера, картеров мостов, рам. Энергия струи, достигающая поверхности, создает значительные касательные напряжения, превышающие предел прочности адгезионной связи многих типов отложений [81, 89].

К несомненным преимуществам гидродинамических методов относятся:

- высокая производительность и эффективность при удалении грубых, прочных отложений;
- отсутствие необходимости в применении химических реагентов (или минимальное их использование), что снижает экологическую нагрузку;
- возможность автоматизации процесса.

Однако методам присущ ряд серьезных ограничений:

- высокий расход энергии и воды;

- невозможность эффективной очистки внутренних полостей и каналов сложной формы;

- опасность повреждения базовой поверхности детали (образование рисок, деформация тонкостенных элементов) при нарушении режимов обработки (чрезмерно высокое давление, неправильное расстояние до детали);

- образование аэрозоля, содержащего частицы грязи и микробы, что требует организации эффективной системы вентиляции и защиты оператора.

Таким образом, гидродинамические методы наиболее оправданы на начальной стадии очистки для удаления основных масс загрязнений, но могут рассматриваться и как универсальное решение для финишной мойки деталей.

Ультразвуковая мойка представляет собой высокоэффективный метод очистки, основанный на явлении акустической кавитации в жидкости. При прохождении ультразвуковых волн (частота 18-44 кГц) в жидкости возникают зоны переменного давления, приводя к образованию, росту и взрывному схлопыванию микроскопических пузырьков пара (кавитации).

Моментальный коллапс кавитационных пузырьков сопровождается локальным выделением значительной энергии: температура в зоне схлопывания может достигать нескольких тысяч градусов, а давление – сотен мегапаскаль. Эти микрогидравлические удары, а также связанные с ними микроструи направленно воздействуют на поверхность детали, эффективно разрушая и отделяя загрязнения, включая такие трудноудаляемые, как полимеризованные масляные пленки, нагары и продукты коррозии [45, 101].

Ключевыми преимуществами ультразвукового метода являются:

- высокая эффективность очистки сложнопрофильных и прецизионных деталей (детали топливной аппаратуры, подшипники, детали гидросистем), включая труднодоступные полости и микроканалы;

- возможность достижения высокой степени чистоты поверхности;

- снижение расхода моющих средств и температуры процесса по сравнению с традиционной иммерсионной мойкой.

Несмотря на высокую эффективность, метод имеет ограничения:

- высокие капитальные затраты на оборудование;
- высокая энергоемкость процесса;
- затухание ультразвуковых колебаний в крупногабаритных деталях и деталях с высоким внутренним демпфированием (из алюминиевых сплавов);
- возможность кавитационной эрозии мягких материалов (например, алюминия, меди) при неправильном выборе режимов (частоты, мощности, времени экспозиции).

Оптимальная эффективность ультразвуковой мойки достигается при использовании специализированных моющих растворов, которые усиливают кавитацию (за счет снижения поверхностного натяжения) и оказывают целенаправленное химическое воздействие на специфические типы загрязнений.

Сравнительный анализ рассмотренных способов мойки, систематизированный в таблице 1.1, наглядно демонстрирует, что ни один из них не является универсальным и лишенным недостатков.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика способов мойки деталей

Способ мойки	Эффективность против загрязнений	Ресурсо-емкость	Универсальность	Экологичность
Иммерсионный	Средняя (зависит от хим. состава)	Высокая (тепло, вода, хим. 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 (минус аэрозоль)
Ультразвуковой	Очень высокая (для сложных отложений)	Средняя (энергия, реагенты)	Высокая	Средняя (стоки)

Проведенный анализ показывает, что наиболее перспективным направлением является разработка и внедрение гибридных (комбинированных) технологий, последовательно или параллельно использующих преимущества разных методов для минимизации их недостатков. Например:

1. Предварительная очистка крупногабаритных агрегатов и удаление основных масс загрязнений с использованием гидродинамического метода с низким давлением и рециркуляцией воды.

2. Основная мойка разобранных узлов и деталей в моющих установках с применением оптимизированных моющих растворов на основе многофункциональных добавок.

3. Финишная промывка в проточной воде или специальных растворах с ингибиторами коррозии.

Такой комбинированный подход позволяет значительно снизить общую ресурсоемкость процесса: сократить расход химических реагентов за счет их целенаправленного использования на наиболее сложных стадиях, уменьшить объем сточных вод за счет организации многоступенчатой системы рециркуляции, а также повысить качество очистки и производительность труда.

Проведенный обзор и сравнительный анализ позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Существующие способы мойки, применяемые изолированно, не в полной мере отвечают современным требованиям по ресурсосбережению, экологичности и эффективности очистки всего спектра загрязнений деталей машин АПК.

2. Наибольший потенциал для создания ресурсосберегающей технологии имеет комбинированный подход, интегрирующий гидродинамическую предварительную очистку с иммерсионной мойкой в моющих растворах.

3. Ключевым элементом, определяющим эффективность и экономичность гибридной технологии, особенно на стадии иммерсионной и финишной мойки, является состав моющего раствора. Существующие составы не обладают требуемой универсальностью и селективностью воздействия на комплексные загрязнения.

Следовательно, разработка новой ресурсосберегающей технологии мойки должна быть сфокусирована на двух взаимосвязанных направлениях:

1. Оптимизация структуры технологического процесса на основе комбинации рассмотренных методов.

2. Создание и исследование нового моющего состава с многофункциональными добавками, обеспечивающего высокую эффективность при сниженных температурах и концентрациях, совместимость с различными методами мойки (особенно с иммерсионным) и обладающего защитными и антикоррозионными свойствами. Именно формирование рецептуры моющего средства является центральным направлением в данном исследовании.

1.3 Анализ современных моющих средств и применяемых добавок. Их достоинства и недостатки

Эффективность любого моечного процесса, независимо от применяемого физического метода, в решающей степени определяется химическим составом и функциональными свойствами моющей среды. Современные моющие средства представляют собой сложные многокомпонентные системы, разработанные для целенаправленного воздействия на различные типы загрязнений. Однако их применение в условиях ремонтного производства предприятий АПК, характеризующегося многономенклатурностью деталей и широким спектром комплексных загрязнений, выявляет ряд системных недостатков [24]. Проведение критического анализа существующих рецептур и применяемых химических агентов позволяет выявить узкие места и сформулировать требования к генерации моющих композиций, ориентированных на ресурсосбережение.

Исторически моющие средства для технических нужд эволюционировали от простых щелочных систем (растворы едкого натра, кальцинированной соды) к сложным сбалансированным композициям, включающим поверхностно-активные вещества (ПАВ), комплексообразователи, ингибиторы коррозии и функциональные добавки. По преобладающему химическому составу их можно классифицировать на [31, 104, 106, 107]:

– щелочные средства. Основу составляют едкий натр (NaOH), силикат натрия (Na_2SiO_3), карбонаты (Na_2CO_3 , NaHCO_3), тринатрийфосфат (Na_3PO_4). Они эффективно омыляют жиры и нейтрализуют кислые продукты окисления масел. Их ключевые недостатки – высокая коррозионная активность в отношении цветных металлов (особенно алюминия) и алюминиевых сплавов, склонность к образованию нерастворимых отложений (накипи) в жесткой воде и низкая эффективность против неомыляемых загрязнений (нагары, полимеризованные смолы).

– кислотные средства. Содержат неорганические (соляная, фосфорная, сульфаминовая кислоты) или органические (лимонная, щавелевая) кислоты. Предназначены для удаления продуктов коррозии, оксидных пленок и неорганических отложений (накипи). Агрессивны к основным металлам, требуют применения мощных ингибиторов коррозии и, как правило, неэффективны против органических загрязнений.

– нейтральные средства. Основным действующим компонентом являются ПАВ и растворители. Обладают мягким действием, безопасны для большинства материалов, но зачастую недостаточно эффективны против прочносвязанных и полимеризованных отложений.

– комбинированные средства. Современные тенденции заключаются в создании композиций, сочетающих щелочные или кислотные бустеры с ПАВ, комплексонами и другими добавками. Именно эта группа представляет наибольший интерес, так как позволяет нивелировать недостатки отдельных компонентов за счет синергетического эффекта.

Несмотря на прогресс в создании комбинированных средств, многие из представленных на рынке составов не адаптированы к специфике загрязнений машин АПК, что приводит к перерасходу реагентов, необходимости стадийной мойки и образованию значительного объема сложных стоков.

К ключевым функциональным компонентам моющих средств относятся:

1. Поверхностно-активные вещества – являются основным компонентом любого современного моющего средства. Они снижают поверхностное натяжение, обеспечивая смачивание поверхности и проникновение моющего

раствора в толщу загрязнения, а также эмульгирование и солубилизацию жировых компонентов. По типу заряда гидрофильной группы различают анионные, катионные, неионогенные и амфотерные ПАВ [108]:

- анионные ПАВ (алкилбензолсульфонаты, алкилсульфаты) – отличаются хорошей моющей способностью и относительно низкой стоимостью. Однако они обладают низкой химической стабильностью в кислых средах, образуют нерастворимые соли с ионами жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}), что приводит к потере эффективности и образованию мыльных шламов;

- неионогенные ПАВ (алкоксилаты жирных спиртов, алкилполиглюкозиды) – проявляют высокую эффективность против нефтяных загрязнений, стабильны в широком диапазоне pH, не чувствительны к жесткости воды и хорошо пенятся или, наоборот, подавляют пенообразование в зависимости от структуры. Их основной недостаток – более высокая стоимость по сравнению с анионными;

- катионные ПАВ (соли четвертичных аммониевых оснований) – обладают выраженным бактерицидным и статическим действием, но слабой моющей способностью и несовместимы с анионными ПАВ;

- амфотерные ПАВ (бетаины, аминоксиды) – совместимы с ПАВ всех типов, обладают мягким действием и хорошими конденсирующими свойствами, но их применение сдерживается высокой ценой.

Для эффективного удаления конгломератных загрязнений необходим синергетический подбор комбинации ПАВ, например, неионогенных (для эмульгирования масел) и анионных (для диспергирования твердых частиц).

2. Щелочные бустеры (моноэтаноламин, метасиликат натрия) создают необходимый уровень pH для омыления жиров и нейтрализации кислых продуктов. Метасиликат натрия, в частности, обеспечивает пассивацию поверхности черных металлов, формируя защитную силикатную пленку. Однако избыточная щелочность опасна для цветных металлов [102].

3. Комплексообразователи (хелаты) – играют критически важную роль в умягчении воды и предотвращении осаждения нерастворимых солей на деталях.

К ним относятся:

- фосфонаты (нитрилотри(метилфосфоновая) кислота (НТФ), этилендиаминтетра(метилфосфоновая) кислота (ЭДТФ)): обладают высокой комплексообразующей способностью;
- цитраты, глюконаты: биоразлагаемые и экологически безопасные, но уступают фосфонатам по эффективности, особенно при низких температурах;
- поликарбоксилаты (полиакрилаты, полималеаты): безфосфорные дисперганты, предотвращающие осаждение и агрегацию частиц загрязнений.

Современной тенденцией является использование композиций комплексонов (например, глюконат натрия с полиакрилатом натрия) для достижения требуемого умягчающего и диспергирующего эффекта при минимизации экологического ущерба [102].

4. Ингибиторы коррозии являются обязательным компонентом для защиты как очищаемых деталей, так и оборудования [58, 74]. Для черных металлов используются – нитриты, силикаты, молибдаты, для цветных металлов (Al, Zn, Cu) – бензотриазол, толилтриазол, производные фосфоновых кислот [36, 37].

Сложность заключается в создании универсальной ингибиторной системы, эффективной для гетерогенных металлокомплексов, типичных для агрегатов машин АПК [75].

5. Растворители (гликоли, гликолевые эфиры, N-метилпирролидон) включаются в состав для усиления растворения полимеризованных углеводов (смола, лаков). Их подбор требует учета температуры вспышки, токсикологических характеристик и совместимости с другими компонентами.

Анализ рынка и практики применения раскрывает ряд системных проблем современных моющих средств:

1. Отсутствие универсальности: составы, эффективные для двигателя, могут быть бесполезны для гидросистемы, и наоборот. Это вынуждает предприятия содержать несколько видов моющих средств, что экономически невыгодно.

2. Высокие рабочие температуры: многие композиции демонстрируют эффективность лишь при 70-90°C, что приводит к колоссальным энергозатратам.

3. Недостаточная биоразлагаемость: устаревшие ПАВ (например, алкилбензолсульфонаты с разветвленной цепью) и фосфонаты создают устойчивую нагрузку на очистные сооружения.

4. Несовместимость с современными методами: некоторые составы могут подавлять кавитацию в ультразвуковых ваннах или давать чрезмерное пенообразование в циркуляционных системах [53].

Экологические аспекты, регламентируемые [8, 13, 15, 82], становятся все более значимым драйвером для разработки новых средств. Требования к биоразлагаемости компонентов (не менее 90%), отсутствию алкилфенолэтоксилатов, тяжелых металлов делают многие традиционные рецептуры морально устаревшими.

Проведенный анализ позволяет констатировать, что, несмотря на обширный арсенал моющих средств и функциональных добавок, существует устойчивая потребность в создании универсальной, низкотемпературной и экологически безопасной композиции, адаптированной к специфике загрязнений деталей машин АПК.

Существующие средства либо обладают узкой специализацией, либо требуют высоких энергозатрат, либо не соответствуют современным экологическим стандартам. Преодоление этих ограничений возможно за счет целенаправленного синергетического подбора компонентов нового поколения:

- комбинации легко биоразлагаемых неионогенных и анионных ПАВ для обеспечения смачивания, эмульгирования и диспергирования;
- сбалансированной щелочной системы с защитным эффектом (например, на основе силикатов);
- системы безопасных комплексонов и диспергантов для умягчения воды и удержания частиц в объеме раствора;
- универсальной ингибиторной системы коррозии для защиты гетерогенных металлокомплексов;
- селективных органических растворителей, эффективных против полимеризованных отложений.

Таким образом, формирование моющего средства с многофункциональными добавками, лишенного выявленных недостатков и ориентированного на применение в ресурсосберегающих технологиях мойки, является актуальной научно-технической задачей. Ее решение позволит существенно повысить эффективность и экологичность процессов очистки в ремонтном производстве агропромышленного комплекса, что определяет цель и задачи последующих экспериментальных исследований данной работы.

1.4 Проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности в процессах мойки

Разработка современных технологий мойки деталей машин АПК неразрывно связана с решением двух взаимосвязанных глобальных задач: минимизацией потребления ресурсов и обеспечением экологической безопасности. Традиционные методы очистки, ориентированные в первую очередь на технологическую эффективность, зачастую характеризуются значительной ресурсоемкостью и формируют устойчивую нагрузку на окружающую среду. Системный анализ проблем в этой сфере позволяет не только выявить ключевые узлы нерационального расхода, но и сформулировать стратегические направления для разработки технологий, соответствующих принципам наилучших доступных технологий.

Анализ ресурсоемкости традиционных технологий мойки позволяет констатировать, что ресурсоемкость процессов мойки проявляется в высоком потреблении воды, энергетических затратах и расходе химических реагентов [23, 71]. Каждый из этих аспектов требует детального рассмотрения.

Водопотребление является одним из наиболее критичных параметров. В типовых схемах мойки, особенно на мелких и средних ремонтных предприятиях, практикуется одноразовое использование воды, что приводит к удельному расходу от 5 до 20 литров на 1 кг очищаемых деталей. Основные потери связаны:

- с промывкой деталей после иммерсионной или струйной мойки для удаления остатков моющего раствора;

- с отсутствием систем рециркуляции и оборотного водоснабжения, когда отработанные растворы и промывные воды безвозвратно сбрасываются в канализацию;

- с неоптимальными режимами гидродинамической очистки, когда для компенсации недостаточной эффективности моющего раствора или оборудования применяется избыточный расход воды под высоким давлением.

Энергетические затраты складываются из нескольких статей:

- тепловая энергия для поддержания температуры моющих растворов в иммерсионных ваннах и моечных машинах (80-95°C). Нагревание рабочих сред может составлять до 70-80% от общих энергозатрат процесса;

- электрическая энергия для привода насосов высокого давления, компрессоров, ультразвуковых генераторов и систем вентиляции;

- энергия, затрачиваемая на приготовление и утилизацию растворов.

Нерациональное использование энергии зачастую обусловлено применением устаревшего оборудования, отсутствием тепловой изоляции на ваннах и трубопроводах, а также использованием моющих композиций, эффективность которых достигается исключительно за счет высокотемпературных режимов [79].

Расход химических реагентов в традиционных технологиях также далек от оптимального. Это связано с несколькими факторами:

- деградация моющих растворов в процессе эксплуатации из-за накопления загрязнений, масел и продуктов их разложения. Отсутствие систем контроля и автоматического дозирования приводит к тому, что растворы заменяются «по регламенту», а не по исчерпанию ресурса, что ведет к перерасходу моющих композиций;

- применение неэффективных составов, которые не обладают достаточной моющей способностью при низких концентрациях, что вынуждает операторов работать с завышенными дозировками;

- отсутствие стадий сепарации и регенерации растворов, позволяющих выделить из них масла и взвешенные вещества и продлить срок службы растворов.

Экологическая проблематика процессов мойки концентрируется вокруг

химического состава и объема образующихся сточных вод, а также энергетического следа технологии.

Сточные воды моечных участков представляют собой сложные многокомпонентные системы, включающие [90]:

- нефтепродукты и жиры, эмульгированные и растворенные в воде. Их концентрация может достигать нескольких г/л. Эти вещества образуют на поверхности воды пленку, препятствующую газообмену, и являются токсичными для гидробионтов;

- поверхностно-активные вещества, в особенности токсичные и трудноразлагаемые (например, алкилбензолсульфонаты с разветвленной цепью). Они снижают поверхностное натяжение воды, нарушая процессы жизнедеятельности в водоемах, и способствуют пенообразованию;

- тяжелые металлы (свинец, медь, цинк, хром), вымываемые из продуктов износа деталей и присадок к маслам. Они обладают кумулятивным токсическим действием;

- фосфаты и фосфонаты (НТФ, ЭДФ), используемые в качестве комплексонов. Попадая в водоемы, они выступают в роли биогенных элементов, провоцируя эвтрофикацию – бурное развитие сине-зеленых водорослей, приводящее к дефициту кислорода и «цветению» воды;

- взвешенные вещества (частицы почвы, продукты коррозии, пыль).

Сброс таких стоков без глубокой очистки недопустим. Однако организация локальных очистных сооружений требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат, что зачастую непосильно для небольших ремонтных предприятий, особенно в сельской местности.

Помимо жидких стоков, процесс мойки генерирует и другие виды отходов [92]:

- отработанные моющие растворы, которые требуют утилизации как химические отходы;

- шламы и пены, извлекаемые из моечных ванн и систем рециркуляции, часто с высоким содержанием тяжелых металлов и стойких органических соединений;

– отработанные фильтрующие материалы.

Косвенный вклад в загрязнение окружающей среды вносят высокие энергозатраты, особенно если энергия производится за счет сжигания ископаемого топлива, что сопровождается выбросами парниковых газов (CO₂) и других загрязнителей.

Ужесточение экологического законодательства является мощным стимулом для модернизации процессов мойки. Ключевыми нормативными документами, определяющими требования в этой сфере, являются [8, 82, 94], устанавливающие нормативы допустимых сбросов загрязняющих веществ, ограничивающие содержание фосфатов в моющих средствах и предъявляющие жесткие требования к биоразлагаемости ПАВ (не менее 90%).

Несоблюдение этих требований влечет за собой значительные штрафные санкции и риски приостановки деятельности, что делает экологически опасные технологии экономически невыгодными.

Преодоление обозначенных проблем невозможно за счет отдельных улучшений; требуется комплексный, системный подход, интегрирующий технологические, химические и организационные решения.

К технологическим решениям относятся:

1. Внедрение замкнутых систем оборотного водоснабжения с многоступенчатой очисткой стоков (механическая фильтрация, флотация, сорбция, мембранные методы). Это позволяет на 90-95% сократить водопотребление и концентрацию загрязнений в сбрасываемых стоках.

2. Применение гибридных технологий, например, комбинации иммерсионной мойки с гидродинамической предварительной очисткой. Это снижает общие энергозатраты.

3. Использование современного энергоэффективного оборудования с теплообменниками для утилизации тепла и системой контроля параметров.

К химическим решениям можно отнести:

1. Разработку и применение моющих средств нового поколения на основе легко биоразлагаемых ПАВ (алкилполиглюкозиды, бетаины), безопасных

комплексонов (поликарбоксилаты) и ингибиторов коррозии.

2. Создание многофункциональных добавок, позволяющих работать при пониженных температурах (30-50°C) и увеличивающих ресурс моющего раствора за счет улучшенной стабильности и диспергирующей способности.

К организационным решениям относятся:

1. Сегрегация (разделение) стоков и организация отдельной очистки наиболее концентрированных потоков.

2. Внедрение системы экологического менеджмента и автоматизированного контроля расхода воды, энергии и реагентов.

Проведенный анализ позволяет сделать однозначный вывод о том, что дальнейшее развитие технологий мойки деталей машин АПК должно осуществляться в русле интеграции принципов ресурсосбережения и экологической безопасности на стадии их проектирования.

К ключевым проблемам относятся: высокое водопотребление, энергоемкость, использование опасных реагентов и образование сложных стоков. Их решение лежит в плоскости создания замкнутых технологических циклов, основанных на применении низкотемпературных гибридных методов мойки и высокоэффективных, экологически безопасных моющих композиций.

Стратегия, формируемая на основе данного анализа для настоящего исследования, заключается в следующем: снижение ресурсоемкости и экологического воздействия должно быть достигнуто не за счет интенсификации традиционных процессов, а за счет синергетического эффекта от применения многофункциональных добавок, которые:

1. Позволяют существенно снизить температуру процесса мойки, сократив энергозатраты.

2. Обладают высокой моющей способностью при низких концентрациях, уменьшая расход реагентов.

3. Увеличивают срок службы моющего раствора за счет улучшенной стабильности и диспергирующей способности, снижая частоту его замены и объем отходов.

4. Состоят из биоразлагаемых и малотоксичных компонентов, минимизируя нагрузку на очистные сооружения.

Таким образом, разработка такого моющего состава является центральным элементом комплексного решения проблем ресурсосбережения и экологической безопасности в ремонтном производстве предприятий АПК.

1.5 Постановка цели и задач исследования

Проведенный в предыдущих подразделах комплексный анализ современного состояния проблемы мойки деталей машин АПК выявил ряд системных противоречий и нерешенных научно-технических задач. С одной стороны, существует объективная необходимость обеспечения высокой степени очистки деталей сложнопрофильных агрегатов (двигатель, КПП, задний мост) от устойчивых комбинированных загрязнений. С другой стороны, традиционные технологические решения, обеспечивающие требуемое качество, характеризуются высокой ресурсоемкостью и значительным негативным воздействием на окружающую среду, что вступает в противоречие с принципами устойчивого развития и действующими экологическими нормативами.

Разрешение данного противоречия видится не в пути частичной оптимизации существующих методов, а в разработке принципиально нового, целостного научно-технического подхода, интегрирующего достижения в области химии моющих сред и машиноведения. Такой подход должен базироваться на создании целевой моющей композиции, свойства которой изначально ориентированы на работу в ресурсосберегающем технологическом процессе, и, одновременно, на адаптации параметров этого процесса к физико-химическим особенностям формируемого средства. Подчеркнутая взаимосвязь «состав – технология» является ключевой для достижения планируемых показателей эффективности.

Таким образом, в качестве системообразующего стержня данного исследования определена научное обоснование и создание ресурсосберегающей технологии мойки, как комплекса взаимосвязанных элементов: моющего средства, режимов его применения и технологической схемы, обеспечивающих

синергетический эффект.

Целью настоящей диссертационной работы является обоснование параметров ресурсосберегающей мойки деталей машин АПК с применением многофункциональных добавок, обеспечивающей снижение эксплуатационных затрат и экологической нагрузки при гарантированном качестве очистки.

Достижение поставленной цели требует последовательного решения ряда взаимосвязанных задач, охватывающих этапы от фундаментального исследования до технологической реализации и оценки эффективности.

Задачи исследования:

1. Провести анализ и идентифицировать морфологический состав и физико-химические свойства типовых загрязнений деталей основных агрегатов машин АПК (двигатель, коробка передач, задний мост), так как выбор стратегии очистки и формирование рецептуры невозможны без точных данных о составе, структуре и адгезионной прочности отложений. Задача направлена на получение исходных данных для целенаправленного синтеза моющей композиции.

2. Синтезировать лабораторный образец моющей композиции с многофункциональными добавками, адаптированный для удаления выявленного спектра загрязнений, что является центральной научно-исследовательской задачей, в рамках которой будет подобран синергетический комплекс компонентов (ПАВ, щелочных бустеров, комплексонов, ингибиторов коррозии, растворителей), обеспечивающий многостадийное воздействие на конгломератные отложения при пониженных температурах.

3. Провести оценку функциональных свойств синтезированной моющей композиции (моющая способность, стабильность, коррозионная активность, экологичность), так как для объективного сравнения и отбора оптимального состава необходима система критериев и методов оценки, имитирующих реальные условия эксплуатации и соответствующих экологическим требованиям.

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

применением полученной композиции, что связано с тем, что установление количественных зависимостей результатов от параметров процесса мойки является основой для оптимизации режимов с точки зрения минимизации энергозатрат.

5. Обосновать параметры ресурсосберегающей мойки и сформировать рекомендации по организации рециркуляции и регенерации моющих растворов, так как внедрение результатов работы в практику требует создания завершенной технологической документации, интегрирующей новое моющее средство в эффективный и экологичный производственный цикл.

6. Выполнить технико-экономическую и экологическую оценки эффективности усовершенствованной технологии мойки в сравнении с базовым аналогом, что обосновано тем, что доказательство практической значимости работы заключается в количественном подтверждении снижения расхода ресурсов (вода, энергия, реагенты) и уменьшения экологического следа, что определяет перспективность внедрения сформированной технологии.

Последовательное решение поставленных задач создает логическую цепочку, ведущую к достижению главной цели диссертационного исследования, и определяет структуру и содержание последующих глав работы.

1.6 Выводы по главе 1 и обоснование направления исследований

Проведенный в первой главе комплексный анализ научно-технических и производственных аспектов процесса мойки деталей позволил сформулировать выводы, которые не только констатируют существующее положение дел, но и четко определяют направления для проведения исследований.

1. Установлена специфика загрязнений деталей основных агрегатов (двигатель, КПП, задний мост), заключающаяся в их комплексном полиморфном характере. Доказано, что преобладающей и наиболее технологически сложной формой являются конгломератные отложения на базе почвенно-растительных компонентов и продуктов старения смазочных материалов. Высокая адгезионная

прочность и структурная стабильность таких отложений обуславливает необходимость применения моющих сред с многостадийным механизмом разрушения.

2. Выявлены системные недостатки существующих способов мойки при их изолированном применении. Гидродинамические методы, обладая высокой эффективностью против грубых отложений, ресурсоемки и неприменимы для эффективной очистки. Традиционная мойка в моющих растворах, особенно иммерсионная, характеризуется сверхнормативным потреблением тепловой энергии и воды. Ультразвуковой метод, являясь высокоэффективным, требует значительных капитальных затрат. Наиболее перспективным признан путь разработки гибридных технологий, комбинирующих преимущества различных методов для минимизации их недостатков.

3. Критически проанализирован состав современных моющих средств. Установлено, что многие коммерческие рецептуры не обладают требуемой универсальностью для очистки всего спектра загрязнений деталей машин АПК, а их эффективность зачастую достигается в высокотемпературных режимах, что противоречит принципам ресурсосбережения. Выявлен дефицит на рынке экологически безопасных композиций, полностью соответствующих современным нормам по биоразлагаемости (не менее 90%) и свободных от реагентов, вызывающих эвтрофикацию.

4. Диагностированы ключевые проблемы ресурсосбережения и экологической безопасности. К ним отнесены: высокое удельное водопотребление при отсутствии систем рециркуляции; значительные энергозатраты, обусловленные необходимостью поддержания высоких температур моющих растворов; перерасход химических реагентов вследствие деградации рабочих составов и отсутствия систем регенерации; образование сложных по составу сточных вод, содержащих нефтепродукты, тяжелые металлы, трудноразлагаемые ПАВ и биогенные элементы.

Сформулированные выводы свидетельствуют, что частные усовершенствования в рамках существующих технологических процессов не способны кардинально разрешить выявленные противоречия между качеством

очистки, ресурсозатратами и экологичностью. В связи с этим, стратегическим направлением исследований определена обоснование и создание целостной ресурсосберегающей технологии, ядром которой является принципиально новая моющая композиция с многофункциональными добавками, изначально спроектированная для работы в условиях низкотемпературных процессов мойки.

Исследования будут сфокусированы на следующих ключевых аспектах:

– в области химии моющих сред: синтез и исследование композиций на основе синергетических смесей биоразлагаемых ПАВ (неионогенных и анионных), органических бустеров, безопасных комплексонов (поликарбоксилаты), универсальных и многофункциональных ингибиторов (тетраборфосфат калия), направленных на целенаправленное разрушение структуры конгломератных загрязнений и ингибирование коррозии. Критерием эффективности будет выступать достижение высокой моющей способности в низкотемпературном диапазоне (40-50°C).

– в области технологии: исследование кинетики процесса мойки в зависимости от режимных параметров (концентрация многофункциональных добавок, температура, продолжительность) с целью оптимизации расхода реагентов и энергии. Формирование принципиальной технологической схемы, базирующейся на комбинации иммерсионной мойки без перемешивания раствора, иммерсионной мойки с перемешиванием раствора и струйной очистки в низкотемпературном режиме в замкнутом цикле с рециркуляцией и очисткой рабочего раствора.

Таким образом, последующие экспериментальные и теоретические исследования будут направлены на создание и обоснование научно-технического решения, обеспечивающего синергию между новым химическим составом моющей среды и адаптированной под него ресурсосберегающей технологией, что в комплексе позволит достичь поставленной цели работы.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Общая методика и программа экспериментальных исследований

Проведенный в первой главе анализ позволил сформулировать цель и задачи работы, заключающиеся в обосновании и создании ресурсосберегающей технологии мойки на основе новых моющих композиций. Для их успешного решения необходима комплексная экспериментальная программа, построенная на принципах системного подхода и планирования эксперимента. Данная программа призвана обеспечить получение достоверных, воспроизводимых и статистически значимых данных, характеризующих как свойства синтезированных моющих средств, так и закономерности протекания технологического процесса мойки в различных условиях.

Общая логика экспериментального исследования выстроена по блочно-иерархическому принципу и включает четыре взаимосвязанных этапа (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Общая логика экспериментального исследования

Исследовали детали основных агрегатов машин АПК: двигателя, коробки передач, заднего моста. В качестве материала для экспериментов использовали

стали Ст3, 40Х, 45, алюминиевый сплав АЛ4, из которых изготавливается основная часть деталей агрегатов машин АПК [73, 77].

Для обеспечения воспроизводимости экспериментов и исключения влияния вариабельности натуральных загрязнений разрабатывается модель конгломератного загрязнения. Состав и способ нанесения модели загрязнения разрабатываются на основе данных, полученных в подразделе 1.1, и описываются в подразделе 2.2.

На этапе синтеза и оценки безопасности и свойств моющих композиций осуществляется синтез и первичная оценка лабораторных образцов моющих композиций. Исходя из результатов анализа, проведенного в подразделе 1.3, в качестве базовых компонентов выбраны:

- неионогенные ПАВ – оксиэтилированные спирты фракций С12-С14 (содержащие оксиэтиленовые группы (C_2H_4O) в молекуле);
- анионные ПАВ – алкилбензолсульфонат натрия и перкарбоксилаты;
- щелочные бустеры – метасиликат натрия, карбонат натрия;
- комплексоны – триполифосфат натрия и безопасные поликарбоксилаты;
- ингибитор коррозии – тетраборфосфат калия (универсален для черных и цветных металлов);
- растворители – моноэтаноламин.

Планирование рецептур и их оптимизация проводятся с использованием методов математического планирования эксперимента, в частности, симплекс-решетчатых планов для смесей. Это позволяет минимизировать количество экспериментов и построить математические модели, описывающие влияние доли каждого компонента на выходные параметры.

Первичный скрининг синтезированных композиций проводится по следующим критериям:

1. Моющая способность в стандартных условиях (концентрация 2%, температура 50°C, время экспозиции 20 мин, иммерсионный способ без перемешивания). Оценивается гравиметрически по проценту удаленного загрязнения.
2. Коррозионная активность по отношению к стали Ст3 и алюминиевому

сплаву АЛ4 (гравиметрический метод по потере массы образцов).

3. Стабильность рабочего раствора (внешний вид, расслаиваемость, пенообразование) после 24 часов выдержки.

По результатам скрининга отбирается наиболее перспективная композиция для углубленного исследования на следующем этапе.

На этапе углубленного исследования эффективности и оптимизации проводится всестороннее изучение свойств отобранной композиции и устанавливаются зависимости эффективности мойки от режимных параметров.

Исследуемые факторы:

- концентрация моющего раствора, % масс. (уровни: 1, 2, 3, 5);
- температура раствора, °С (уровни: 30, 40, 50, 60);
- продолжительность процесса, мин (уровни: 5, 10, 20, 30);
- тип энергетического воздействия (иммерсия без перемешивания, иммерсия с перемешиванием, струйная обработка ($P = 0,3$ МПа)).

В качестве выходных параметров (критерий оптимизации) рассматривали:

1. Кинетику процесса мойки (зависимость степени очистки от времени).
2. Энергию активации процесса (рассчитывали из уравнения Аррениуса).
3. Поверхностное натяжение растворов (методом тензиометрии).
4. Эмульгирующую способность и стабильность эмульсии «масло-вода».
5. Коррозионную активность при длительной экспозиции (до 24 часов) (изучали гравиметрическим методом на образцах из стали Ст3 и алюминиевого сплава АЛ4 в соответствии с [14]).

Для изучения влияния факторов использовали полный факторный план. Обработку данных проводили методами регрессионного и дисперсионного анализа с использованием специализированного программного обеспечения (Statistica). На основе полученных данных проводили оптимизацию состава моющего средства и режимных параметров методами многокритериальной оптимизации (функция желательности Харрингтона).

Этап апробации в натуральных условиях является заключительным этапом и направлен на валидацию лабораторных результатов в реальных условиях.

Натурные испытания оптимальной моющей композиции и созданного технологического режима проводили на базе ремонтного участка ООО «СПК Новоселки». Использовали детали, снятые с машин в процессе ремонта их агрегатов. Формировали две группы: контрольная (мойка по стандартной технологии предприятия) и опытная (мойка по созданной технологии). Проводили сравнительную оценку по следующим показателям:

- качество очистки (гравиметрически, визуально и инструментально);
- удельный расход воды, электроэнергии и моющего средства;
- трудоемкость операции;
- количество образующихся отходов (шламы, отработанный раствор).

Для оценки качества очистки натуральных деталей использовали как гравиметрический и визуальный методы, так и инструментальный метод: микроскопия поверхности.

Для обеспечения достоверности результатов применяли комплекс современных физико-химических методов анализа, методы и средства измерений:

- гравиметрия – для оценки моющей способности и коррозии;
- микроскопия – для изучения морфологии и элементного состава загрязнений и очищенных поверхностей;
- тензиометрия – для измерения поверхностного натяжения;
- рН-метрия – для контроля кислотности рабочих растворов.

Таким образом, представленная программа экспериментальных исследований является логически завершенной и обеспечивает фундаментальное изучение свойств новых моющих композиций и оценки их эффективности в условиях, адекватных реальному производственному процессу.

2.2 Характеристика объектов исследования

Успешная реализация программы экспериментальных исследований, изложенной в предыдущем подразделе, в решающей степени зависит от корректного выбора и характеристики объектов исследования. Адекватность и воспроизводимость получаемых данных требуют системного подхода к

разработке моделей загрязнений, которые с достаточной степенью достоверности имитируют натурные эксплуатационные отложения. Данный раздел посвящен обоснованию выбора объектов и детальному описанию методик их подготовки.

Как показано в разделе 1.1, натурные загрязнения представляют собой сложные композиты. Использование в экспериментах случайных отложений снятых с агрегатов машин деталей не позволяет обеспечить воспроизводимость результатов. В связи с этим, центральной задачей являлась формирование модели конгломератного загрязнения, адекватно отражающей состав, структуру и адгезионные свойства натуральных аналогов.

На основе данных элементного и функционального анализа реальных отложений была получена трехкомпонентная модель, включающая:

1. Минеральную (абразивно-почвенную) компоненту, представляющую смесь кварцевого песка марки КВО-1 (фракция 50-200 мкм) – 70% и каолина марки КР-1 – 30%, обосновывающуюся тем, что кварцевый песок моделирует абразивные частицы почвы, а каолин – глинистую фракцию, обладающую высокой дисперсностью и способностью к набуханию. Соотношение 70/30 соответствует среднему содержанию песчаных и глинистых частиц в типовых почвах Рязанской области.

2. Нефтяную (органическую) компоненту, представляющую смесь нового моторного масла М-10Г2К – 80% и отработанного моторного масла (после 250 моточасов) – 20%, обосновывающуюся тем, что свежее масло обеспечивает жидкую углеводородную фазу, а отработанное масло вводит в модель продукты окисления, полимеризации, присадки и металлосодержащие частицы (износ), что критически важно для имитации адгезионных и реологических свойств.

3. Связующую компоненту (моделирующую полимеризованные отложения), представляющую собой смолисто-асфальтеновые отложения, выделенные из того же отработанного масла методом центрифугирования. Этот компонент отвечает за цементацию минеральных частиц в углеводородной матрице и обеспечивает высокую начальную адгезионную прочность моделируемого загрязнения, имитируя лаки и нагары.

Массовое соотношение компонентов в модели загрязнения было установлено как 3 : 1 : 1 (минеральная : нефтяная : связующая) на основе статистического анализа данных по составу 25 проб реальных отложений.

Для обеспечения однородности и заданной толщины слоя разработана следующая технологическая процедура нанесения:

1. Приготовление пасты, которая заключается в тщательном перемешивании компонентов в лабораторной мешалке при температуре 80°C до получения однородной пастообразной массы.

2. Нанесение пасты на подготовленные детали осуществляется с помощью пневматического распылителя с соплом диаметром 1,5 мм. Давление воздуха 0,2 МПа, расстояние до образцов 200 мм, что обеспечивает формирование слоя толщиной около 1,0 мм.

3. Термостатирование, что выполняется размещением детали с нанесенным загрязнением в сушильный шкаф и выдержкой при температуре 150°C в течение 2 часов. Данный режим имитирует процесс «спекания» и полимеризации загрязнений, происходящий при работе нагретых узлов (двигатель, КПП, задний мост).

4. Кондиционирование (охлаждение) образцов проводится в эксикаторе над силикагелем до комнатной температуры, затем образцы выдерживаются в стандартных атмосферных условиях (18-22°C, влажность 55-65%) в течение 24 часов перед началом испытаний.

Контроль качества модельного загрязнения включает:

– гравиметрический контроль – определение массы нанесенного загрязнения взвешиванием до и после нанесения;

– микроскопический контроль – оценка однородности распределения и толщины слоя;

Для проведения узкоспециализированных исследований использовались стандартизированные образцы – пластины из стали Ст3 (плотность 7850 кг/м³) и сплава АЛ4 (плотность 2650 кг/м³) размерами 50×100×3 мм (0,00015 м³) для гравиметрической оценки коррозии и моющей способности.

Таким образом, разработанный комплекс объектов исследования – стандартизированных пластин со смоделированными загрязнениями состава и свойств создает надежную и воспроизводимую экспериментальную базу для проведения комплекса исследовательских работ, запланированных в диссертационном исследовании. Использование данной методологии позволяет минимизировать погрешность, связанную с неконтролируемой вариабельностью исходных загрязнений, и сосредоточиться на изучении влияния состава моющих средств и режимных параметров на эффективность процесса мойки.

2.3 Методы и приборы для анализа загрязнений и оценки чистоты поверхности

Достоверная оценка эффективности моющих композиций и исследование кинетики процесса мойки требуют применения комплекса взаимодополняющих методов анализа, позволяющих получать количественные и качественные данные о составе загрязнений и состоянии поверхности до и после очистки. Выбор методов обусловлен необходимостью характеризовать объекты на макро- и микроуровнях, что обеспечивает всестороннее понимание механизмов очистки и воздействия моющих сред на материал подложки.

Гравиметрический (весовой) метод является базовым, прямым и наиболее точным способом количественной оценки массы удаленного загрязнения.

Сущность метода заключается в точном измерении массы детали до нанесения модельного загрязнения (M_1), после его нанесения и термостатирования (M_2) и после проведения процесса мойки и сушки (M_3). Степень очистки (C , %) рассчитывается по формуле [91]:

$$C = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100\%.$$

Методика проведения:

1. Все взвешивания проводятся на аналитических весах *Adventurer* с точностью $\pm 0,0001$ г (рисунок 2.2) и заносятся в таблицу 2.1.

2. Перед каждым взвешиванием образцы выдерживаются в эксикаторе над силикагелем в течение 1 часа для устранения влияния сорбционной влаги.



Рисунок 2.2 – Аналитические весы *Adventurer*

3. Для каждого экспериментального режима используется не менее трех параллельных образцов (повторностей). Результат представляется как среднее арифметическое значение.

Таблица 2.1 – Форма таблицы для экспериментальных данных

Параметр	№№ образцов	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загр., (M ₂)	загр. до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загр. после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загр., (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
	1								
	2								
	3								

Преимуществом гравиметрического метода является высокая точность, прямота метода, не требует калибровки, но дает интегральную характеристику по всей поверхности, не учитывая локальную неоднородность очистки [106].

Микроскопические методы используются для визуализации и качественной оценки изменения состояния поверхности после мойки.

Метод оценки смачиваемости, которая характеризуется краевым углом смачивания является косвенным, но высокочувствительным способом контроля наличия на поверхности ультратонких невидимых пленок [19], в частности, остаточных гидрофобных углеводородов.

Сущность метода заключается в измерении краевого угла θ , образуемого

капель эталонной жидкости (бидистиллированной воды) с поверхностью. Высокий угол ($>90^\circ$) свидетельствует о гидрофобности поверхности (присутствие масел, жиров), низкий угол ($<30^\circ$) – о гидрофильности (чистый металл, покрытый гидрофильной оксидной пленкой) [3]. Методика проведения:

1. Для измерения краевого угла применяют катетометр КМ-6 с угломерной головкой.
2. На очищенную и высушенную поверхность пластины с помощью микрометрического шприца наносится капля бидистиллированной воды.
3. Измерение контактного угла с точностью ± 1 градус проводится не менее чем в 5 различных точках на поверхности образца.

Данный метод является важным для оценки качества обезжиривания при подготовке поверхностей к нанесению покрытий или сборке прецизионных узлов.

Ни один из методов в отдельности не может дать исчерпывающей оценки. Поэтому в работе применялась интегральная (трехуровневая) система контроля чистоты: гравиметрический (проходили образцы со степенью очистки $C \geq 95\%$), визуально-инструментальный (оптическая микроскопия) (проходили образцы, которые не имеют видимых загрязнений), молекулярный (тест на смачиваемость) (проходили образцы, со значением краевого угла смачивания менее 40° ($\theta < 40^\circ$)).

Только образцы, прошедшие все три уровня контроля, считаются качественно очищенными. Такой комплексный подход обеспечивает получение объективных и всесторонних данных, необходимых для обоснованных выводов об эффективности формируемых моющих композиций и технологий.

2.4 Методы оценки эффективности моющего состава

Создание нового моющего средства требует всесторонней оценки его функциональных свойств, выходящей за рамки простого определения моющей способности. Эффективная промышленная композиция должна не только удалять загрязнения, но и обладать рядом технологических и эксплуатационных характеристик, обеспечивающих ее стабильность, безопасность для оборудования и окружающей среды. Представленная в данном разделе система

методов оценки позволяет получить комплексную характеристику синтезированных составов и провести их сравнительный анализ по ключевым критериям, определяющим пригодность для внедрения в ресурсосберегающую технологию.

Моющая способность является интегральным показателем, определяющим основное функциональное назначение состава. Для ее оценки применяется гравиметрический метод, методика которого, изложенная в подразделе 2.3, является базовой. В данном контексте она дополняется исследованием зависимости моющей способности от ключевых факторов:

- концентрации моющего раствора, % масс. (0,5, 1, 2, 3, 5);
- температуры, °С (30, 40, 50, 60);
- продолжительности экспозиции, мин (5, 10, 20, 30);

Результаты представляются серией кинетических кривых и изотерм, позволяющих определить оптимальные и минимально достаточные параметры применения.

Пенообразование является критически важным параметром раствора для технологий, использующих циркуляцию и распыление раствора (активирование центрифугой, струйные установки). Избыточная пена снижает эффективность переноса энергии, приводит к переливам и затрудняет визуальный контроль [4].

Методика оценки пенообразования описана в подразделе 3.4.

Стабильность моющего раствора подразумевает его способность сохранять однородность и функциональные свойства в процессе эксплуатации и хранения [47]. Стабильность моющего раствора подразделяют на:

- 1) термодинамическую стабильность (расслаиваемость);

Методика оценки термодинамической стабильности заключается в том, что рабочий раствор (концентрация 2%) выдерживается в мерном цилиндре с притертой пробкой в термостате при температурах 20°С и 50°С в течение 30 суток и через 1, 7, 14 и 30 суток визуально оценивается наличие расслоения, осадка, изменения прозрачности. Определяется объем отделившейся фазы.

- 2) химическую стабильность;

Методика оценки химической стабильности сводится к контролю изменения рН и общего щелочного числа раствора в процессе его использования

(после каждой мойки). Снижение общего щелочного числа более чем на 20% от исходного считается критическим. Порядок замера рН приведен в подразделе 3.4.

3) стабильность в условиях механического воздействия.

Оценка стабильности при механическом воздействии основана на определении изменения перечисленных выше параметров, а также склонности к пенообразованию после циркуляции раствора в замкнутом контуре в течение 8 часов.

Коррозионная активность определяет воздействие моющего средства на материал деталей и оборудования. Для ее оценки применяют гравиметрический метод по изменению массы [12, 19, 33].

В соответствии с методикой гравиметрического метода подготовленные и взвешенные образцы (пластины из стали Ст3 и алюминиевого сплава АЛ4 размерами 50×20×3 мм) полностью погружаются в исследуемый моющий раствор (концентрация 2%, температура 50°С) на 4 часа. После экспозиции образцы извлекаются, промываются дистиллированной водой, высушиваются и взвешиваются.

Скорость коррозии (K , г/м²·ч) рассчитывается по формуле [21, 34]:

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t},$$

где m_0 и m_1 – масса образца до и после испытания, г;

S – площадь поверхности, м²;

t – время экспозиции, ч.

После испытания образцы дополнительно исследуются оптической микроскопией на предмет выявления питтинговой и точечной коррозии [22, 54].

Для проведения сравнительного анализа и отбора оптимальных композиций разработана система сбалансированных критериев, приведенная в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Критерии оценки эффективности моющей композиции

Параметр	Метод оценки	Критерий для перспективной композиции	Вес критерия
Моющая способность (50°С, 20 мин)	Гравиметрический	≥ 95%	0,30

Пенообразование (Н ₀)	Пенометрия	≤ 50 мм	0,15
Стабильность (30 сут.)	Визуальная оценка	Отсутствие расслоения	0,15
Коррозионная активность (Ст3)	Гравиметрический	≤ 0,1 г/м ² ·ч	0,20
Коррозионная активность (АЛ4)	Гравиметрический	≤ 0,05 г/м ² ·ч	0,20

Итоговая оценка производится методом суммирования баллов, что позволяет объективно выбрать состав, наилучшим образом сочетающий высокую моющую способность с технологичностью и экологической безопасностью. Данный комплекс методов обеспечивает получение данных, необходимых для перехода к этапу оптимизации рецептуры и режимов применения.

2.5 Описание лабораторной установки для моделирования процесса мойки

Для проведения воспроизводимых исследований кинетики и эффективности процесса мойки в контролируемых условиях на кафедре технической эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО «РГАТУ им. П.А. Костычева» была разработана и собрана универсальная лабораторная установка. В рамках настоящего диссертационного исследования конструкция данной установки была модернизирована для решения специфических экспериментальных задач. Она позволяет моделировать ключевые технологические воздействия – иммерсионное без перемешивания, иммерсионное с перемешиванием, струйное – как в отдельности, так и в комбинированном режиме, что соответствует принципам гибридной технологии, обоснованным в главе 1. Установка обеспечивает контроль и регистрацию режимных параметров, что является необходимым условием для получения достоверных данных и построения адекватной математической модели процесса.

Внешний вид, вид емкости для раствора, корзины для деталей, привода (КШМ) для корзины, ТЭНа, дискового активатора, схема и экспликация модернизированной установки приведены на рисунках В.1-В.3 (приложение В).

Для проведения исследований применялся специализированный моющий раствор, приготовленный по оптимизированной рецептуре, полученной в рамках диссертационного исследования (глава 3). Состав раствора включал:

- синергетическая смесь ПАВ (Н-1 : А-2 = 3:1) – 5,5% масс.;
- метасиликат натрия – 7,0% масс.;
- комплексообразующая система (НТА : цитрат натрия = 2:1) – 3,0% масс.;
- ингибиторная система (тетраборфосфат калия) – 1,2% масс.;
- пеногаситель (полидиметилсилоксан) – 0,2% масс.
- вода дистиллированная – до 100%.

Раствор предназначен для эффективного удаления прочных смолисто-асфальтовых отложений и полимеризованных углеводородных загрязнений с поверхностей деталей машин АПК.

Установка может работать в четырех режимах, которые подробно описаны в подразделе 4.4.

Для обеспечения достоверности результатов проведена метрологическая аттестация установки, включающая проверку и калибровку всех измерительных каналов (температура, давление) по образцовым средствам измерения и валидацию гидродинамической части (определение реального расхода и формы факела распыла форсунок при различных давлениях).

Воспроизводимость результатов экспериментов обеспечивается:

- высокой стабильностью поддержания контролируемых параметров (температура $\pm 1^\circ\text{C}$, давление $\pm 0,05$ МПа);
- использованием стандартизированных образцов и модельных загрязнений;
- проведением не менее трех параллельных испытаний для каждой точки плана эксперимента.

Модернизированная установка является универсальным исследовательским инструментом, позволяющим не только сравнивать эффективность различ-

ных моющих композиций в идентичных условиях, но и изучать фундаментальные закономерности процесса мойки, устанавливать критерии подобия и осуществлять масштабирование технологии на промышленные объекты.

2.6 Методы математического планирования эксперимента и статистической обработки данных

Экспериментальное исследование многокомпонентных моющих систем и многофакторного процесса мойки сопряжено со значительными материальными и временными затратами. Стихийный (однофакторный) подход, при котором последовательно изменяется один параметр при фиксированных остальных, является крайне неэффективным, не позволяет оценить взаимодействие факторов и не гарантирует нахождения истинного оптимума. В связи с этим, для решения задач настоящего исследования был применен системный подход, основанный на методах математического планирования эксперимента, который позволяет при минимальном количестве опытов получить максимальный объем информации, математическую модель и статистически обоснованные выводы [86].

Математическое планирование эксперимента – это целенаправленное управление процессом исследования, при котором заранее определяются состав, последовательность и условия проведения опытов, необходимые и достаточные для решения поставленной задачи с требуемой точностью [2, 85].

Ключевыми понятиями математического планирования эксперимента являются:

- фактор (x_i) – независимая переменная, влияющая на процесс (например, концентрация ПАВ, температура, время);
- уровень фактора – фиксированное значение фактора в эксперименте (нижний, базовый, верхний);
- интервал варьирования (λ_i) – величина изменения фактора при переходе от базового уровня к верхнему или нижнему;
- отклик (y) – выходной параметр, характеризующий эффективность процесса (степень очистки, скорость коррозии, поверхностное натяжение);
- математическая модель – уравнение, связывающее отклик с факторами.

В большинстве случаев используется полиномиальная аппроксимация, например, полином n -ой степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{(n-1)n}x_n$$

Процесс планирования эксперимента включает следующие этапы:

1. Выбор факторов и интервалов их варьирования на основе литературных данных и результатов предварительных экспериментов.
2. Выбор выходных параметров (откликов) и методов их измерения.
3. Выбор плана эксперимента, адекватного поставленной задаче.
4. Реализация плана и проведение экспериментов в рандомизированной последовательности для исключения систематической погрешности.
5. Статистический анализ результатов, проверка адекватности полученной модели и ее интерпретация.

Для решения задачи оптимизации многокомпонентной смеси, каковой является моющая композиция, наиболее эффективным является применение симплекс-решетчатых планов (планов Шеффе).

В данной задаче факторами являются доли (x_i) отдельных компонентов в смеси, и их сумма равна единице ($\sum x_i = 1$). Это накладывает ограничение на область экспериментирования – симплекс (треугольник для 3-х компонентов, тетраэдр для 4-х и т.д.). Традиционные факторные планы в этом случае неприменимы.

Методика проведения симплекс-решетчатых планов приведена в приложении В.

В нашем случае с ограничениями на компоненты использовали модифицированный D-оптимальный план на основе симплексной решетки.

Для исследования влияния количественных факторов (концентрация моющего средства, концентрация многофункциональной добавки, температура раствора, продолжительность мойки) на процесс мойки применяется полный факторный эксперимент (ПФЭ).

ПФЭ типа $y = 2^n$ (где n – число факторов) позволяет получить линейную модель с эффектами взаимодействия. Он является насыщенным, то есть число

опытов равно числу оцениваемых коэффициентов.

Методика проведения ПФЭ плана 2⁴ приведена в приложении В.

Применение описанного комплекса методов математического планирования и статистической обработки позволяет перейти от эмпирического поиска к целенаправленному и научно обоснованному исследованию, минимизировать количество экспериментов, получить количественные закономерности и прогнозировать поведение системы в заданной области факторов.

2.7 Выводы по главе 2

В рамках второй главы диссертации был разработан и систематизирован комплексный методический аппарат для проведения экспериментальных исследований, направленных на достижение цели работы. Проведенная работа позволяет сформулировать следующие основополагающие выводы:

1. Разработана и научно обоснована единая программа экспериментальных исследований, построенная по блочно-иерархическому принципу, которая включает четыре последовательных этапа: подготовка и моделирование загрязнений; синтез и скрининг моющих композиций; углубленное исследование эффективности и оптимизация; апробация в модельных и натуральных условиях. Структура обеспечивает логическую целостность исследований, от изучения свойств новых составов до проверки их эффективности в условиях производства.

2. Сформирован репрезентативный комплекс объектов исследования, включающий детали основных агрегатов машин АПК из черных и цветных металлов, а также стандартизированные образцы. Получена и проверена трехкомпонентная модель конгломератного загрязнения (минеральная : нефтяная : связующая = 3:1:1 по массе) и технология ее нанесения, что обеспечивает воспроизводимость результатов. Данный подход позволяет исключить неконтролируемую вариабельность свойств исходных загрязнений и сосредоточиться на изучении влияния состава моющих средств и режимных параметров.

Обоснован комплекс взаимодополняющих методов анализа, образующих трехуровневую систему контроля чистоты поверхности и эффективности моющих

составов: гравиметрический, оптическая микроскопия и измерение краевого угла смачивания, которая обеспечивает всестороннюю оценку – от количественного определения массы удаленного загрязнения до выявления субмикронных органических пленок и оценки гидрофильности поверхности.

3. Модернизирована лабораторная установка для моделирования процесса мойки, интегрирующая возможности иммерсионной без перемешивания, и с перемешиванием раствора, а также струйной обработки в контролируемых условиях. Конструкция установки, оснащенной системой управления, позволяет не только сравнивать моющие составы, но и исследовать кинетику процесса, устанавливать критерии подобия и осуществлять масштабирование технологии.

4. Создана комплексная система критериев и методов оценки свойств моющих композиций, выходящая за рамки определения моющей способности. Система включает оценку технологических (пенообразование, стабильность раствора) и эксплуатационных (коррозионная активность) свойств. Введение взвешенной системы критериев позволяет проводить объективный сравнительный анализ и выбор перспективных составов для дальнейшей оптимизации.

5. 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 – полный факторный план. Применение методов статистической обработки данных (по t-критерию и F-критерию) обеспечивает надежность и достоверность получаемых математических моделей.

Таким образом, в результате выполнения второй главы создан полноценный, научно-обоснованный и метрологически обеспеченный методический фундамент для проведения всего комплекса экспериментальных исследований, направленных на создание и обоснование ресурсосберегающей технологии мойки. Сформированный инструментарий позволяет перейти от аналитического этапа к практической реализации поставленных задач в последующих главах.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОЮЩЕГО СОСТАВА

3.1 Теоретические предпосылки подбора компонентов моющего состава

Формирование высокоэффективного моющего состава, отвечающего критериям ресурсосбережения и экологической безопасности, требует системного подхода, основанного на глубоком понимании физико-химических механизмов взаимодействия компонентов моющей среды с загрязнениями и поверхностью детали. Эмпирический подбор рецептур является малопродуктивным без опоры на теоретический фундамент, устанавливающий взаимосвязь между структурой и функциональными свойствами химических агентов. Настоящий раздел посвящен анализу теоретических основ формирования моющей композиции, направленной на целенаправленное разрушение сложнокомпонентных отложений, идентифицированных в разделе 1.1.

Процесс очистки от сложного загрязнения представляет собой последовательность взаимосвязанных стадий, которые требуют функционального воздействия со стороны моющего раствора. Ключевыми стадиями являются: смачивание и пенетрирование, диспергирование (пептизация) и эмульгирование, стабилизация дисперсной фазы и предотвращение ресорбции [60].

Смачивание является первоначальной и важной стадией. С термодинамической точки зрения, условием самопроизвольного растекания жидкости по твердой поверхности является снижение свободной поверхностной энергии на границе раздела фаз. Для гидрофобных загрязнений (нефтяные компоненты) этот процесс энергетически невыгоден. Преодоление данного барьера достигается за счет введения ПАВ, молекулы которых адсорбируются на границах раздела, значительно снижая поверхностное натяжение (σ) на линии «раствор-загрязнение» и «раствор-подложка». Критерием эффективного смачивания является выполнение условия Юнга в модифицированном виде [57] (рисунок 3.1):

$$\sigma_{TG} - \sigma_{TJ} - \sigma_{JG} \cdot \cos \theta > 0, \text{ где } \theta - \text{краевой угол смачивания.}$$

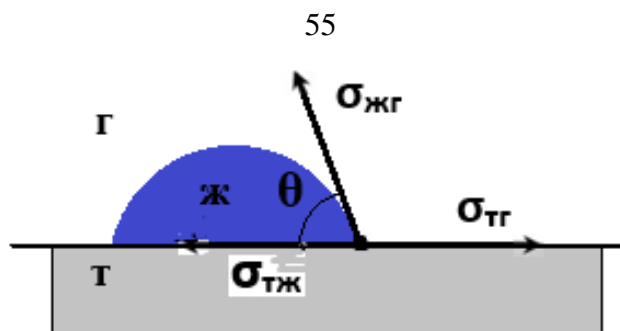


Рисунок 3.1 – Пояснение закона Юнга

Эффективные ПАВ обеспечивают значение краевого угла смачивания θ , стремящееся к нулю, что соответствует полному смачиванию.

Пенетрирование раствора в микропоры и капилляры загрязнения описывается законом Пуазейля и значительно ускоряется при снижении поверхностного натяжения σ . Одновременно с этим происходит набухание и разрыхление структуры загрязнения за счет осмотического проникновения воды в гидрофильные прослойки (глинистые минералы) и пептизации связующей компоненты [62].

Диспергирование и эмульгирование – это стадии, на которых происходит непосредственное отделение частиц загрязнения от поверхности и друг от друга. Теоретической основой является теория ДЛФО (Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека), описывающая баланс сил молекулярного притяжения (Ван-дер-Ваальса) и электростатического отталкивания в дисперсной системе. Адсорбция ионогенных ПАВ на поверхности частиц загрязнения увеличивает их потенциал, усиливая электростатическое отталкивание и препятствуя повторной коагуляции. Эмульгирование жировой компоненты происходит за счет образования адсорбционных слоев ПАВ на поверхности капель масла, что снижает межфазное натяжение и создает стерический и/или электростатический барьер для их слияния (образование мицелл и микроэмульсий) [103].

Исходя из многостадийности процесса и комплексного характера загрязнений, стратегия формирования моющего состава должна базироваться на принципе синергетического подхода, при котором комбинация компонентов обеспечивает больший эффект, чем сумма их индивидуальных действий.

1. Подбор системы ПАВ

Основу моющего действия составляет синергетическая смесь ПАВ

различной природы:

– неионогенные ПАВ (алкоксилаты жирных спиртов, алкилполиглюкозиды) являются ключевыми агентами для эмульгирования нефтяных загрязнений. Их эффективность не зависит от жесткости воды, а способность образовывать объемные гидратированные оксиэтильные «шлейфы» обеспечивает мощное стерическое отталкивание диспергированных частиц. Термическая стабильность и низкое пенообразование делают их идеальными для циркуляционных систем мойки;

– анионные ПАВ (алкилбензолсульфонаты, α -олефинсульфонаты) обеспечивают высокое начальное моющее действие, эффективное диспергирование твердых частиц за счет создания высокого отрицательного потенциала и снижают адгезию загрязнений к поверхности. Их синергия с неионогенными ПАВ проявляется в образовании смешанных мицелл с пониженной критической концентрацией мицеллообразования (ККМ).

2. Подбор щелочных бустеров и комплексонов

– щелочные бустеры (метасиликат натрия, карбонат натрия) выполняют различные функции: создают оптимальный щелочной фон (рН 10-12) для омыления эстерифицированных жиров; нейтрализуют кислые продукты окисления масел; способствуют пептизации белковых и полисахаридных компонентов. Метасиликат натрия дополнительно проявляет ингибирующие свойства по отношению к черным металлам, пассивируя их поверхность;

– комплексоны (хелаты) необходимы для умягчения воды и связывания ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}), которые, взаимодействуя с анионными ПАВ, образуют нерастворимые «известковые мыла», снижающие эффективность моющего процесса. В соответствии с экологическими требованиями, предпочтение отдается безопасным комплексонам – поликарбоксилатам (полиакрилаты), которые, помимо хелатирующей способности, обладают диспергирующим и антиресорбционным действием («эффект поролона»).

3. Подбор функциональных добавок и растворителей

– ингибиторы коррозии (тетраборфосфат) являются обязательным компонентом для защиты как очищаемых деталей, так и оборудования моечной

установки. Их подбор осуществляется с учетом щелочности среды и природы конструкционных материалов;

– водорастворимые органические растворители (гликолевые эфиры, моноэтаноламин) включаются в состав для целенаправленного воздействия на полимеризованные, неомыляемые компоненты загрязнений (смолы, асфальтены, лаки). Они действуют как «транспортные агенты», обеспечивая пенетрирование и набухание этих отложений с последующим их диспергированием под действием ПАВ.

Теоретической основой для снижения ресурсоемкости является смещение рабочих параметров процесса в низкотемпературную область. Это достигается:

- снижением энергии активации процесса мойки путем применения высокоактивных ПАВ с низкой ККМ и синергетических смесей;
- использованием композиций, эффективных при низких концентрациях (1-3%), что сокращает расход реагентов;
- введением компонентов, повышающих стабильность рабочего раствора (полиэлектролиты-дисперганты), что позволяет его многократную рециркуляцию.

Экологическая безопасность закладывается на молекулярном уровне через выбор легко биоразлагаемых компонентов. Критерием служит наличие в молекуле ПАВ линейного алкильного радикала и эфирных связей, легко разрушаемых микроорганизмами (в отличие от разветвленных радикалов и устойчивых ароматических ядер). Приоритет отдается ПАВ на основе возобновляемого сырья (алкилполиглюкозиды) и безопасным комплексонам.

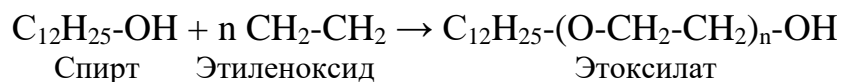
Таким образом, теоретической предпосылкой для формирования целевой моющей композиции является создание синергетической многокомпонентной системы, в которой каждый агент целенаправленно воздействует на определенную стадию процесса или компонент загрязнения, а их совместное действие обеспечивает эффективную очистку в мягких, ресурсосберегающих условиях при соответствии строгим экологическим нормативам. Данный теоретический базис служит основой для планирования эксперимента по синтезу и оптимизации рецептур в последующих разделах работы.

3.2 Синтез и подбор многофункциональных добавок

На основании теоретических предпосылок, изложенных в предыдущем разделе, был проведен целенаправленный синтез и подбор ключевых компонентов для создания многофункциональной моющей композиции. Критериями отбора служили не только функциональная эффективность в отношении специфических загрязнений деталей машин АПК, но и их совместимость между собой, способность работать в низкотемпературном диапазоне, а также соответствие требованиям экологической безопасности. Данный этап работы представлял собой систематический поиск синергетических комбинаций, обеспечивающих возникновение кооперативных эффектов.

Ядро моющей композиции составила бинарная смесь неионогенных и анионных ПАВ, подобранная для достижения синергизма в моющем действии и снижения ККМ.

1. Неионогенные ПАВ. В качестве основы были выбраны алкоксилаты жирных спиртов с различной степенью этоксилирования. Синтез проводили путем каталитической этоксиляции спиртов С12-С14 (присоединения этиленоксида к спиртам) в среде инертного газа при температуре 150-180°C и давлении 0,4-0,6 Мпа:



Эта технология позволяет превратить простые спирты в высокоэффективные, безопасные и экологичные компоненты для моющего средства.

Спирты С12-С14 – это жирные спирты с длиной углеродной цепи 12-14 атомов: С12 – лауриловый спирт (12 атомов углерода), С13 – тридециловый спирт (13 атомов углерода), С14 – миристиловый спирт (14 атомов углерода). Их получают из нефти или из растительных масел.

В результате синтеза получили этоксилаты спиртов С12-С14 двух образцов, которые условно обозначены: Н-1 – С12-14-алкилполиглицозид (7-8 молей этиленоксида), Н-2 – оксиэтилированный изононилфенол (10-12 молей этиленоксида).

Оба образца обладают лучшей растворимостью, лучшими моющими свойствами, управляемой пенообразующей способностью и хорошей биоразлагаемостью. Проявляют высокую стабильность в жесткой воде и эффективно эмульгируют минеральные масла.

2. Анионные ПАВ. Для обеспечения электростатического диспергирующего эффекта и снижения пенообразования использовали условно обозначенные: А-1 – линейный алкилбензолсульфонат натрия, обладающий высокой моющей способностью и биоразлагаемостью, А-2 – альфа-олефин-сульфонат натрия, устойчивый к окислению и гидролизу в щелочной среде.

3. Чтобы найти идеальную комбинацию моющих компонентов, проводили измерение «силы натяжения» на поверхности жидкости. Методом тензиометрии (на приборе К6) были определены силы поверхностного натяжения в зависимости от концентрации ПАВ: для индивидуальных ПАВ и их смесей в различных соотношениях.

Методика экспериментов:

- готовили растворы ПАВ разных концентраций;
- измеряли поверхностное натяжение каждого раствора: Н-(1, 2) отдельно, А-(1, 2) отдельно и их смесей в соотношениях 1:1, 2:1, 3:1, 1:3 отдельно;
- определили оптимальную смесь с оптимальным соотношением 3:1 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Обоснование выбора комбинации ПАВ

Состав	ККМ, (%)	Поверхностное натяжение, (мН/м)
Н-1	0,38	32,1
Н-2	0,42	35,2
А-1	0,41	34,4
А-2	0,39	32,9
Смесь Н-1 и А-2		
соотношением 1:1	0,35	29,7
соотношением 2:1	0,28	29,1
соотношением 3:1	0,25	28,5
соотношением 1:3	0,31	29,4

Установлено, что комбинация Н-1 и А-2 в массовом соотношении 3:1 демонстрирует выраженный синергетический эффект: ККМ смеси снижается на 35% по сравнению с теоретически рассчитанной, а равновесное поверхностное натяжение при критической концентрации мицеллообразования составляет 28,5 мН/м против 32-35 мН/м для индивидуальных компонентов, что обеспечивает снижение расхода ПАВ для получения одинакового эффекта. Данная комбинация была выбрана в качестве основы моющей системы.

На основе анализа в качестве щелочного бустера выбрана тройная система:

- метасиликат натрия (6-8%) – обеспечивает pH 11,5-12,0;
- карбонат натрия (3-5%) – стабилизирует щелочность;
- тринатрийфосфат (2-3%) – усиливает эмульгирующую способность.

Комплексоны – это органические соединения, которые содержат способные к координации атомы азота, серы или фосфора, а также карбоксильные, фосфоновые и другие кислотные группы. Они образуют с катионами металлов устойчивые внутрикомплексные соединения – комплексонаты (хелаты) [109].

В соответствии с экологическими требованиями использовали безопасные комплексоны:

- тринатрийнитрилотриацетат (НТА) в качестве эффективного хелатора ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} .
- цитрат натрия для повышения биоразлагаемости комплексона.
- полиакрилат натрия в качестве дисперганта (улучшает образование дисперсных систем) и антиресорбента (предотвращает повторное осаждение загрязнений на очищаемую поверхность).

Оптимальным соотношением оказалась комбинация 2% тринатрийнитрилотриацетата НТА + 1% цитрата натрия + 1% полиакрилата натрия.

Учитывая гетерогенность материалов агрегатов (сталь, чугун, алюминиевые сплавы), была сформирована универсальная ингибиторная система (тетраборфосфат калия (ТБФК)), эффективная для защиты черных и цветных металлов, а также алюминиевых сплавов.

В экспериментах использовали ТБФК брутто-формулы $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{K}_3\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Образование этого соединения установлено изучением боратных водно-солевых систем методами физико-химического анализа [32, 84, 97]. ТБФК синтезировали по реакции совместной кристаллизации из водных растворов тетрабората и фосфата в стехиометрических соотношениях в реакционной колбе емкостью 2000 мл, в которую наливали 1200 мл дистиллированной воды и вносили 212 г (1 моль) фосфата калия и 234 г (1 моль) тетрабората калия. Смесь непрерывно перемешивали в течение 6 часов при температуре 25°C, как указано в [67]. Далее раствор переносили в кристаллизатор для выращивания кристаллов.

Соединение ТБФК кристаллизуется в виде гексагональных призм с выходом продукта 93-95 %, хорошо растворяется в воде. Для полученного соединения брутто-формулы $K_2B_4O_7 \cdot K_3PO_4 \cdot 2H_2O$ определена плотность, которая равна 1,535 г/см³, а вычисленные молекулярный и удельный объемы соответственно равны 314,01 см³/моль и 0,652 см³/г.

На основе проведенных исследований сформированы 3 базовые рецептуры:

1. Рецепт А: С преобладанием Н-1 (8%) + А-2 (3%).
2. Рецепт Б: Сбалансированная Н-1/Н-2 (5%/3%) + А-1 (4%).
3. Рецепт В: С усиленной щелочной системой (метасиликат 10%).

Данные рецептуры прошли предварительные испытания по методикам раздела 2.4, результаты которых приведены в сводной таблице 3.2, таблице В.1 и на рисунке В.4 (приложение В).

Таблица 3.2 – Зависимость моющей способности растворов разных рецептур от температуры

Температура, °С	Степень очистки, %		
	Рецептура А	Рецептура Б	Рецептура С
30	44,2	35,8	32,7
40	65,4	58,2	60,5
50	93,9	87,1	90,1
60	92,8	86,8	89,9

Испытания показали эффективность очистки 87,1-93,9% при температуре 50°C и продолжительности мойки 20 мин. Наибольшую перспективу показала рецептура А, которая была выбрана для дальнейшей оптимизации.

Таким образом, систематический подход к подбору многофункциональных добавок позволил создать перспективные базовые композиции с учетом как технологических требований, так и экологических нормативов.

3.3 Исследование влияния компонентов на моющие и защитные свойства композиции

После формирования базовых рецептур моющей композиции (подраздел 3.2) возникла необходимость в количественной оценке влияния каждого компонента на выходные параметры системы и оптимизации их соотношения. Эмпирический перебор вариантов в условиях многокомпонентной системы является крайне трудоемким и не гарантирует достижения оптимума. В связи с этим, для решения данной задачи был применен метод математического планирования эксперимента, позволяющий получить адекватную математическую модель и выявить значимые факторы и эффекты их взаимодействия.

Целью данного этапа исследований являлось установление количественной зависимости между концентрацией основных функциональных компонентов и интегральными характеристиками моющей композиции. В качестве входных факторов (x_i) были выбраны четыре варьируемых параметра, определяющих ключевые свойства композиции:

- 1) x_1 – концентрация синергетической смеси ПАВ (Н-1 : А-2 = 3:1), % масс;
- 2) x_2 – концентрация щелочного бустера (метасиликат натрия), % масс;
- 3) x_3 – концентрация комплексообразующей системы (НТА : цитрат натрия = 2:1), % масс;
- 4) x_4 – концентрация ингибиторной системы (тетраборфосфат калия), % масс.

В качестве выходных параметров (Y_i), характеризующих эффективность состава, были определены:

- 1) Y_1 – моющая способность, % (гравиметрический метод, при температуре раствора 50°C, продолжительности мойки 20 мин);
- 2) Y_2 – скорость коррозии стали Ст3, г/м²·ч (гравиметрический метод, при

температуре раствора 50°C, продолжительности экспозиции 4 ч);

3) Y_3 – стабильность рабочего раствора, баллы (визуальная оценка по 5-балльной шкале после 24 ч выдержки);

Для исследования был выбран дробный факторный план 2^{4-1} (разрешающая способность IV), в соответствии с которым мы проводили эксперимент с четырьмя факторами, каждый на 2-х уровнях, используя экономный план из 8 опытов ($2^{4-1} = 2^3 = 8$), вместо 16 (по полному факторному плану). Качество этого плана (разрешающая способность IV) означает и гарантирует, что мы сможем четко оценить индивидуальное влияние каждого из 4-х факторов по отдельности, но оценки взаимодействий пар факторов будут смешаны друг с другом.

Для построения математической модели для моющей способности (Y_1) составили таблицу 3.3 факторов и уровней.

Таблица 3.3 – Факторы и уровни

Фактор	Обозначение	Уровень (-)	Уровень (+)
Концентрация ПАВ, x_1	A	2%	5%
Концентрация бустера, x_2	B	2%	6%
Концентрация комплексона, x_3	C	1%	3%
Концентрация ингибитора, x_4	D	0,5%	1,5%

Интервалы варьирования факторов были установлены на основе предварительных экспериментов. Все опыты проводились в случайной последовательности с тремя параллельными измерениями для каждого отклика.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем:

1. Подготовка растворов:

- взвешивание компонентов с точностью $\pm 0,0001$ г;
- приготовление растворов в дистиллированной воде;
- контроль pH каждого раствора.

2. Подготовка и термостатирование загрязнение при температуре 50°C и нанесение на опытные образцы.

3. Взвешивание образцов на этапах эксперимента с точностью $\pm 0,0001$ г.

4. Проведение испытаний по матрице планирования при температуре

раствора 50°C, продолжительности мойки 20 мин.

5. Определение моющей способности (Y_1) гравиметрическим методом.

Составили матрицу дробно факторного плана 2^{4-1} и обозначили отклики для каждого из 8 опытов стандартными обозначениями (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Матрица плана 2^{4-1} и обозначения откликов

№ опыта	Факторы				Отклик, (y)	
	A	B	C	D=ABC	y_i	стандартное обозначение
1	-1	-1	-1	-1	y_1	(1)
2	+1	-1	-1	+1	y_2	ad
3	-1	+1	-1	+1	y_3	bd
4	+1	+1	-1	-1	y_4	ab
5	-1	-1	+1	+1	y_5	cd
6	+1	-1	+1	-1	y_6	ac
7	-1	+1	+1	-1	y_7	bc
8	+1	+1	+1	+1	y_8	abcd

Проводя 8 опытов, получили 8 значений отклика [(1), ad, bd, ... abcd]. Мы можем вычислить 7 оценок: 4 главных эффекта (линейные) и 3 оценки для пар взаимодействий. Подставляем значения отклика в формулы, приведенные ниже, получаем численные значения 4 главных эффектов (линейных) (A, B, C, D) и 3 оценки для пар взаимодействий: [AB+CD], [AC+BD], [AD+BC].

Для дробного факторного плана 2^{4-1} с разрешающей способностью IV формулы для расчета линейных (главных) эффектов выводятся по тому же принципу, что и для полного факторного плана [2].

Для любого фактора x в плане 2^{4-1} эффект определяется по формуле:

$$\text{Эффект } [x] = (1/4) \cdot [(Сумма откликов при } x = +1) - (Сумма откликов при } x = -1)].$$

Знаменатель 4, потому что в каждой группе (где $x = +1$ и $x = -1$) находится по 4 опыта из 8. Эффект показывает, на сколько единиц в среднем изменится отклик при движении фактора от низкого уровня к высокому.

Используя общий принцип и таблицу 3.4, выводим формулы и определим эффекты по каждому фактору и их взаимодействиям.

1. Главный эффект фактора А

– А = +1: опыты ad, ab, ac, abcd (y_2, y_4, y_6, y_8);

– А = -1: опыты (1), bd, cd, bc (y_1, y_3, y_5, y_7).

$$\text{Эффект А} = (1/4) \cdot [(y_2 + y_4 + y_6 + y_8) - (y_1 + y_3 + y_5 + y_7)] = (1/4) \cdot [(78,2 + 84,8 + 71,3 + 91,8) - (43,7 + 57,9 + 50,8 + 64,1)] = (1/4) \cdot [(326,1) - (220,1)] = 26,5.$$

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект А} = (1/4) \cdot [(ad + ab + ac + abcd) - ((1) + bd + cd + bc)].$$

2. Главный эффект фактора В

– В = +1: опыты bd, ab, bc, abcd (y_3, y_4, y_7, y_8);

– В = -1: опыты (1), ad, cd, ac (y_1, y_2, y_5, y_6).

$$\text{Эффект В} = (1/4) \cdot [(y_3 + y_4 + y_7 + y_8) - (y_1 + y_2 + y_5 + y_6)] = (1/4) \cdot [(57,9 + 84,8 + 64,1 + 91,8) - (43,7 + 78,2 + 50,8 + 71,3)] = 13,65.$$

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект В} = (1/4) \cdot [(bd + ab + bc + abcd) - ((1) + ad + cd + ac)].$$

3. Главный эффект фактора С

– С = +1: опыты cd, ac, bc, abcd (y_5, y_6, y_7, y_8);

– С = -1: опыты (1), ad, bd, ab (y_1, y_2, y_3, y_4).

$$\text{Эффект С} = (1/4) \cdot [(y_5 + y_6 + y_7 + y_8) - (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)] = (1/4) \cdot [(50,8 + 71,3 + 64,1 + 91,8) - (43,7 + 78,2 + 57,9 + 84,8)] = 3,35.$$

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект С} = (1/4) \cdot [(cd + ac + bc + abcd) - ((1) + ad + bd + ab)].$$

4. Главный эффект фактора D

– D = +1: опыты ad, bd, cd, abcd (y_2, y_3, y_5, y_8);

– D = -1: опыты (1), ab, ac, bc (y_1, y_4, y_6, y_7).

$$\text{Эффект D} = (1/4) \cdot [(y_2 + y_3 + y_5 + y_8) - (y_1 + y_4 + y_6 + y_7)] = (1/4) \cdot [(78,2 + 57,9 + 50,8 + 91,8) - (43,7 + 84,8 + 71,3 + 64,1)] = 3,3.$$

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект D} = (1/4) \cdot [(ad + bd + cd + abcd) - ((1) + ab + ac + bc)].$$

Расчет эффектов взаимодействий

Общая формула для любого эффекта x в плане 2^{4-1} :

Эффект $[x] = (1/4) \cdot [\text{Сумма откликов при } x = +1] - [\text{Сумма откликов при } x = -1]$.

Напишем формулы для каждой из трех оценок парных взаимодействий:

1. Оценка для пары $[AB + CD]$

Эта оценка объединяет эффекты взаимодействий AB и CD :

- знак произведения $A \cdot B = +1$ для опытов: (1), ab, cd, abcd (y_1, y_4, y_5, y_8);
- знак произведения $A \cdot B = -1$ для опытов: ad, bd, ac, bc (y_2, y_3, y_6, y_7).

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект } [AB + CD] = (1/4) \cdot [((1) + ab + cd + abcd) - (ad + bd + ac + bc)].$$

$$\text{Эффект } [AB + CD] = (1/4) \cdot [(y_1 + y_6 + y_3 + y_8) - (y_2 + y_4 + y_5 + y_7)] = (1/4) \cdot [(43,7 + 71,3 + 57,9 + 91,8) - (78,2 + 84,8 + 50,8 + 64,1)] = 3,3.$$

2. Оценка для пары $[AC + BD]$

Эта оценка объединяет эффекты взаимодействий AC и BD :

- знак произведения $A \cdot C = +1$ для опытов: (1), ac, bd, abcd (y_1, y_6, y_3, y_8);
- знак произведения $A \cdot C = -1$ для опытов: ad, ab, cd, bc (y_2, y_4, y_5, y_7).

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект } [AC + BD] = (1/4) \cdot [((1) + ac + bd + abcd) - (ad + ab + cd + bc)].$$

$$\text{Эффект } [AC + BD] = (1/4) \cdot [(y_1 + y_4 + y_5 + y_8) - (y_2 + y_3 + y_6 + y_7)] = (1/4) \cdot [(43,7 + 84,8 + 50,8 + 91,8) - (78,2 + 57,9 + 71,3 + 64,1)] = -0,1 \text{ (незначим)}.$$

3. Оценка для пары $[AD + BC]$

Эта оценка объединяет эффекты взаимодействий AD и BC :

- знак произведения $A \cdot D = +1$ для опытов: (1), ad, bc, abcd (y_1, y_2, y_7, y_8);
- знак произведения $A \cdot D = -1$ для опытов: bd, ab, cd, ac (y_3, y_4, y_5, y_6).

В стандартных обозначениях:

$$\text{Эффект } [AD + BC] = (1/4) \cdot [((1) + ad + bc + abcd) - (bd + ab + cd + ac)].$$

$$\text{Эффект } [AD + BC] = (1/4) \cdot [(y_1 + y_2 + y_7 + y_8) - (y_3 + y_4 + y_5 + y_6)] = (1/4) \cdot [(43,7 + 78,2 + 64,1 + 91,8) - (57,9 + 84,8 + 50,8 + 71,3)] = 3,25.$$

Если оценка, например, $[AB+CD]$ статистически значима, это означает, что значимо либо взаимодействие AB , либо взаимодействие CD , либо оба, то есть мы не можем определить, какое именно значимо. Аналогично для $[AC+BD]$ и $[AD+BC]$. Наша цель – найти главные (линейные) эффекты, которые не смешаны ни с чем.

Нужно отметить, что эффект фактора (взаимодействий факторов) – это не сам коэффициент в модели, а изменение отклика при движении от низкого уровня фактора (–1) к высокому (+1), рассчитанное по всем проведенным опытам. Коэффициент в математической модели (в уравнении регрессии) обычно составляет половину эффекта.

Проверка значимости для каждого эффекта была проведена с использованием t-критерия Стьюдента. Используя факторы и уровни, составим матрицу планирования с реальными концентрациями (таблица 3.5) и проведем эксперименты, результаты которых показаны в сводной таблице 3.6 и таблице В.2 (приложение В).

Таблица 3.5 – Матрица планирования с реальными концентрациями

Опыт	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
1	2,0	2,0	1,0	0,5
2	5,0	2,0	1,0	1,5
3	2,0	6,0	1,0	1,5
4	5,0	6,0	1,0	0,5
5	2,0	2,0	3,0	1,5
6	5,0	2,0	3,0	0,5
7	2,0	6,0	3,0	0,5
8	5,0	6,0	3,0	1,5

Таблица 3.6 – Результаты экспериментов

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
Степень очистки, %	43,7	78,2	57,9	84,8	50,8	71,3	64,1	91,8

Свободный член (β_0) математической модели, полученной по данным дробного факторного эксперимента, равен среднему арифметическому всех результатов опытов в матрице планирования.

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i = 1/8 (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) = 1/8 (43,7 + 78,2 + 57,9 + 84,8 + 50,8 + 71,3 + 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot 174,4 = 21,8.$$

Коэффициенты математической модели определим по формулам:

$$\beta_1 = 1/8 (-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) = 1/8 (-43,7 + 78,2 - 57,9 + 84,8 - 50,8 + 71,3 - 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot 38,7 = 4,83 \text{ (оценка для A + BCD)}.$$

$$\beta_2 = 1/8 (-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) = 1/8 (-43,7 - 78,2 + 57,9 + 84,8 - 50,8 - 71,3 + 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot 21,6 = 2,7 \text{ (оценка для B + ACD)}.$$

$$\beta_3 = 1/8 (-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8) = 1/8 (-43,7 - 78,2 - 57,9 - 84,8 + 50,8 + 71,3 + 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot 13,4 = 1,7 \text{ (оценка для C + ABD)}.$$

$$\beta_4 = 1/8 (-y_1 + y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) = 1/8 (-43,7 + 78,2 + 57,9 - 84,8 + 50,8 - 71,3 - 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot 14,8 = 1,9 \text{ (оценка для D + ABC)}.$$

$$\beta_{12} = 1/8 (y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8) = 1/8 (43,7 + 78,2 - 57,9 - 84,8 - 50,8 - 71,3 + 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot 4,0 = 0,5 \text{ (оценка для AB + CD)}.$$

$$\beta_{13} = 1/8 (y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8) = 1/8 (43,7 - 78,2 + 57,9 - 84,8 - 50,8 + 71,3 - 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot (-0,2) = -0,025 \text{ (Оценка для AC + BD) (незначим)}.$$

$$\beta_{14} = 1/8 (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8) = 1/8 (43,7 - 78,2 - 57,9 + 84,8 + 50,8 - 71,3 - 64,1 + 91,8) = 1/8 \cdot (12,8) = 1,6 \text{ (оценка для AD + BC)}.$$

Согласно принципу наследственности и принципу разреженности, тройные и более высокие взаимодействия крайне редко являются значимыми на практике [85]. Это позволяет нам не рассчитывать коэффициенты тройных и более высоких взаимодействий и интерпретировать значимые главные эффекты чисто, без смещения. Например, если β_1 значим, мы с высокой долей уверенности можем сказать, что это влияние фактора А, а не взаимодействия BCD. Аналогично для $\beta_2, \beta_3, \beta_4$.

Получена математическая модель для моющей способности (Y_1):

$$Y_1 = 21,8 + 4,83x_1 + 2,7x_2 + 1,7x_3 + 1,9x_4 + 0,5x_1x_2 + 1,6x_1x_4.$$

Анализ уравнения показывает:

1) Концентрация ПАВ (x_1) оказывает наиболее сильное положительное влияние на моющую способность (коэффициент +4,83). Увеличение доли ПАВ в исследованном диапазоне приводит к линейному росту степени очистки.

2) Щелочной бустер (x_2) также вносит значительный положительный вклад (+2,7), что объясняется его ролью в омылении жиров и пептизации органических компонентов.

3) Выявлены положительные эффекты взаимодействий (x_1x_2) между ПАВ и щелочью (+0,5) и (x_1x_4) между ПАВ и ингибитором (+1,6), свидетельствующие об их синергизме: щелочная среда усиливает моющее действие ПАВ, вероятно, за счет дополнительного разрыхления структуры загрязнения. ТБФК, применяемый в моющем составе как ингибитор коррозии, в водной среде проявляет многофункциональную активность, сочетая ингибирующие и моющие свойства.

4) Комплексоны (x_3) оказывают слабое положительное влияние, что может быть связано с небольшим синергетическим эффектом с ПАВ.

Аналогичными расчетами были получены уравнения регрессии для каждого выходного параметра (Y_2 , Y_3) в кодированных переменных, отражающие значимые эффекты.

2. Математическая модель для коррозионной активности (Y_2):

$$Y_2 = 5,91 - 1,1x_1 - 3,5x_4 + 1,25x_2 - 0,8x_1x_4.$$

Анализ уравнения выявил:

1) Ингибиторная система (x_4) демонстрирует ожидаемый сильный защитный эффект (-3,5).

2) ПАВ (x_1) также проявляют ингибирующие свойства (-1,1), что может быть связано с образованием адсорбционных слоев на металле.

3) Щелочной бустер (x_2) незначительно увеличивает коррозию (+1,25), что характерно для щелочных сред.

4) Отрицательный эффект взаимодействия (x_1x_4) указывает на синергизм между ПАВ и ингибиторами в защите металла.

3. Математическая модель для стабильности раствора (Y_3):

$$Y_3 = 2,3 + 0,6x_1 + 0,5x_3 - 0,3x_2.$$

Анализ уравнения показывает:

1) Комплексоны (x_3) оказывают наибольшее положительное влияние на стабильность (+0,5).

2) ПАВ (x_1) также стабилизируют систему (+0,6).

3) Щелочной бустер (x_2) снижает стабильность, вероятно, из-за высаливания (-0,3).

3.4 Оптимизация рецептуры моющего средства и установление его физико-химических свойств

Получение математических моделей, адекватно описывающих влияние компонентов на свойства моющей композиции, создало теоретическую базу для заключительного этапа – комплексной оптимизации рецептуры. Однако задача оптимизации многокомпонентной системы является по своей природе многокритериальной, требующей нахождения компромисса между противоречивыми требованиями к выходным параметрам. Данный раздел посвящен решению этой задачи с применением методов многокритериального анализа и всесторонней характеристике физико-химических свойств оптимизированного состава.

На основе полученных математических моделей была проведена многокритериальная оптимизация с использованием функции желательности Харрингтона. Данный метод позволяет свернуть несколько выходных параметров в единый критерий оптимизации [2], что дает возможность количественно оценить и сравнить различные составы. Целевыми критериями были заданы: максимизация Y_1 ($\geq 92\%$), минимизация Y_2 ($\leq 0,06$ г/м²·ч) и максимизация Y_3 ($\geq 4,5$ баллов).

Для оптимизации четырехкомпонентной смеси с ограничениями на компоненты (x_1 (ПАВ) – 5% масс. (не может быть 0% или 100%); x_2 (бустер) – 6% масс.; x_3 (комплексон) – 3% масс.; x_4 (ингибитор) – 1,5% масс.) нельзя использовать план Шеффе {4,2}, которым обычно пользуются для оптимизации рецептур (составов) смесей, поэтому использовали модифицированный D-оптимальный план на основе симплексной решетки, который специально разработан для таких случаев. Он выбирает N точек из множества допустимых комбинаций, чтобы максимизировать информативность при заданных ограничениях. Это означает, что областью экспериментирования является не весь симплекс, а только его внутренняя усеченная часть («обрезанный симплекс») [2].

Обозначим:

x_1 – доля компонента ПАВ (Н-1 : А-2 = 3:1): 5% масс.;

x_2 – доля компонента щелочной бустер (метасиликат натрия): 6% масс.;

x_3 – доля компонента комплексон (триполифосфат натрия): 3% масс.;

x_4 – доля компонента ингибитор коррозии (тетраборфосфат калия): 1,5% масс.

$$\text{Сумма } x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1.$$

Критериями оптимизации являются:

Y_1 – моющая способность (%);

Y_2 – коррозионная активность ($\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$);

Y_3 – стабильность раствора (баллы).

Условия эксперимента:

- общий состав: 100%;
- концентрация рабочего раствора: 3%;
- температура: 50°C;
- время обработки: 20 мин;
- объект: стальные (Ст3) пластины с модельным загрязнением.

Процедура оптимизации включала следующие этапы:

1. Определение частных функций желательности (d_i) для каждого отклика (Y_1 – моющая способность, Y_2 – коррозионная активность, Y_3 – стабильность). Для Y_1 и Y_3 задавалась возрастающая шкала преобразования (максимизация), для Y_2 – убывающая (минимизация). Граничные значения желательности устанавливались на основе технологических требований: $d_1(Y_1 < 85\%) = 0$, $d_1(Y_1 \geq 95\%) = 1$; $d_2(Y_2 > 0,1 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}) = 0$, $d_2(Y_2 \leq 0,04 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}) = 1$; $d_3(Y_3 < 3,5) = 0$, $d_3(Y_3 \geq 5,0) = 1$.

Функция Харрингтона преобразует натуральные значения выходных переменных (Y_1, Y_2, Y_3) в шкалу желательности (d) от 0 до 1:

$$d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)] \rightarrow \max;$$

$$d_2(Y_2) = \exp[-\exp(-(0,1 - Y_2)/0,02)] \rightarrow \max;$$

$$d_3(Y_3) = (Y_3 - 3)/2 \rightarrow \max,$$

где $d_1(Y_1)$, $d_2(Y_2)$, $d_3(Y_3)$ – желательность моющей способности, желательность коррозионной активности, желательность стабильности раствора соответственно; \exp – экспонента; ($\exp[n] = e^n$, где: e – число Эйлера ($\approx 2,718281828$));

80 – пороговое значение моющей способности, %, $y_1 - 80 = 0$ – точка перегиба: при $Y_1 < 80$ – желательность падает; при $Y_1 > 80$ – желательность быстро растет;

5 – параметр крутизны функции, определяет «резкость» перехода: большее значение – более плавный переход, меньшее значение – более резкий переход.

$d = 0$ – совершенно нежелательное значение;

$d = 1$ – идеальное, максимально желательное значение.

Для моющей способности 80-95% по функции $d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)]$ рассчитана желательность (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Результаты расчета желательности для моющей способности

Y_1 (%)	Расчет	$d_1(Y_1)$	Интерпретация
80	$d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)] = \exp[-\exp(0)] = \exp[-1]$	0,368	Пороговое значение
85	$d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)] = \exp[-\exp(-1)]$	0,692	Желательно
90	$d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)] = \exp[-\exp(-2)]$	0,873	Очень желательно
95	$d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)] = \exp[-\exp(-3)]$	0,950	Идеально

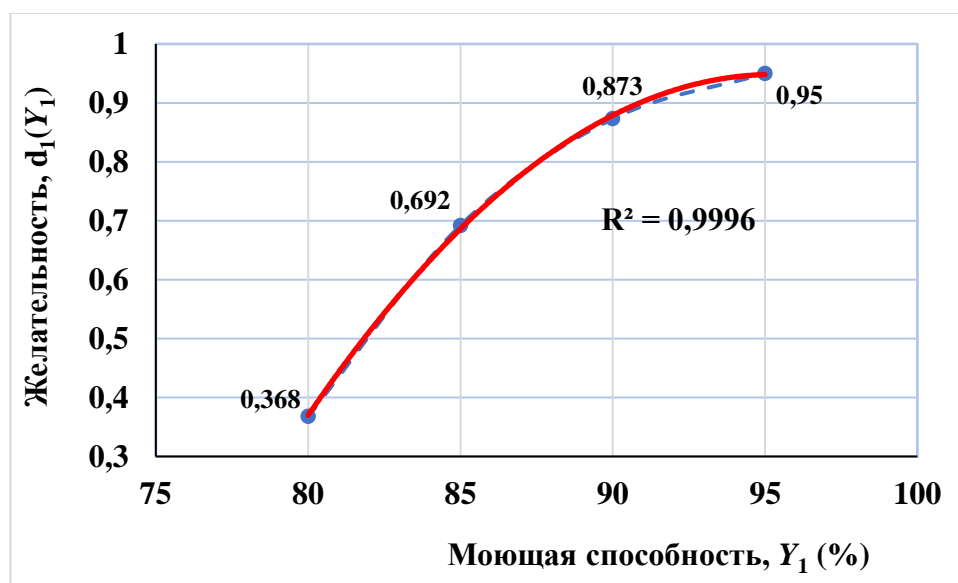


Рисунок 3.2 – Рост желательности при $Y_1 > 80$

Анализ таблицы 3.7 и рисунка 3.2 позволяет убедиться, что функция имеет нелинейный рост желательности:

- от 80% до 85%: прирост $0,692 - 0,368 = 0,324$;
- от 85% до 90%: прирост $0,873 - 0,692 = 0,181$;
- от 90% до 95%: прирост $0,950 - 0,873 = 0,077$.

Это показывает, что каждое последующее улучшение моющей способности дает все меньший прирост желательности (закон убывающей полезности).

Следовательно, $d_1(Y_1) = 0,950$ соответствует отличному уровню моющей способности 95%. Дальнейшее улучшение моющей способности до 100% дает незначительный прирост желательности, что экономически нецелесообразно.

Функция желательности Харрингтона для минимизации коррозионной активности выглядит:

$$d_2(Y_2) = \exp[-\exp(-(0,1 - Y_2)/0,02)] \rightarrow \max,$$

где $\max d_2(Y_2)$ означает «коррозия минимальна»;

0,1 – верхний порог коррозии (максимально допустимое значение);

0,02 – параметр крутизны перехода;

$(0,1 - Y_2)$ – определяет «отдаленность» от опасной зоны.

В таблице 3.8 и рисунке 3.3 приведены результаты расчета и интерпретация желательности коррозионной активности.

Таблица 3.8 – Результаты расчета и интерпретация желательности коррозионной активности

Y_2 (г/м ² ·ч)	Расчет	$d_2(Y_2)$	Интерпретация
0,12	$\exp[-\exp(-(0,1-0,12)/0,02)] = \exp[-\exp(1)]$	0,068	Очень нежелательно
0,10	$\exp[-\exp(-(0,1 - 0,10)/0,02)] = \exp[-\exp(0)] = \exp[-1]$	0,368	Пороговое значение
0,08	$\exp[-\exp(-(0,1 - 0,08)/0,02)] = \exp[-\exp(-1)]$	0,692	Хорошо
0,06	$\exp[-\exp(-(0,1 - 0,06)/0,02)] = \exp[-\exp(-2)]$	0,873	Очень хорошо
0,04	$\exp[-\exp(-(0,1 - 0,04)/0,02)] = \exp[-\exp(-3)]$	0,950	Отлично
0,02	$\exp[-\exp(-(0,1 - 0,02)/0,02)] = \exp[-\exp(-4)]$	0,982	Идеально

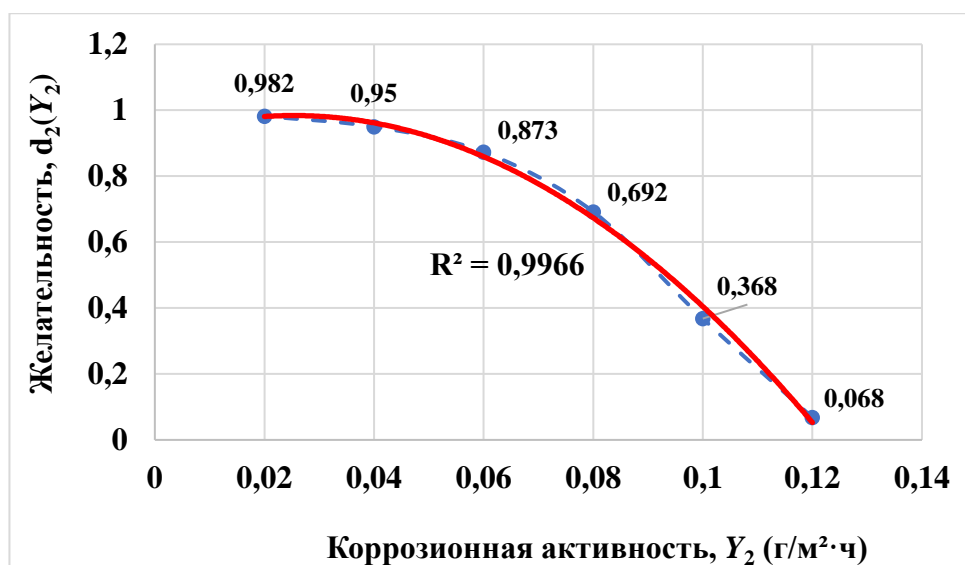


Рисунок 3.3 – Снижение желательности с увеличением коррозионной активности

Функция желательности Харрингтона для повышения стабильности раствора (Y_3) выглядит:

$$d_3(Y_3) = (Y_3 - 3)/2 \rightarrow \max,$$

где Y_3 – стабильность раствора (баллы по 5-балльной шкале);

3 – минимально допустимое значение стабильности, балл (при $Y_3 < 3$ раствор нестабилен, непригоден к использованию, $Y_3 = 3$ – минимально допустимая стабильность, соответствует $d_3 = 0$);

2 – диапазон изменения от минимального до максимального значения.

Расчет функции желательности для различных значений стабильности раствора (Y_3) приведен в таблице 3.9, графически показана на рисунке 3.4.

Таблица 3.9 – Расчет функции желательности для различных значений Y_3

Y_3 (баллы)	Расчет $d_3(Y_3)$	$d_3(Y_3)$	Интерпретация
1	$(1 - 3)/2$	-1,0	Недопустимо ($d_3 < 0$)
2	$(2 - 3)/2$	-0,5	Недопустимо ($d_3 < 0$)
3	$(3 - 3)/2$	0,0	Порог допустимого
4	$(4 - 3)/2$	0,5	Хорошо
5	$(5 - 3)/2$	1,0	Идеально

В сравнении с другими функциями желательности ($d_1(Y_1)$ и $d_2(Y_2)$) функция желательности $d_3(Y_3)$ имеет линейный тип, а не полиномиальный. Это

объясняется отсутствием критического порога (стабильность важна, но не является критическим параметром как моющая способность и коррозионная активность раствора).

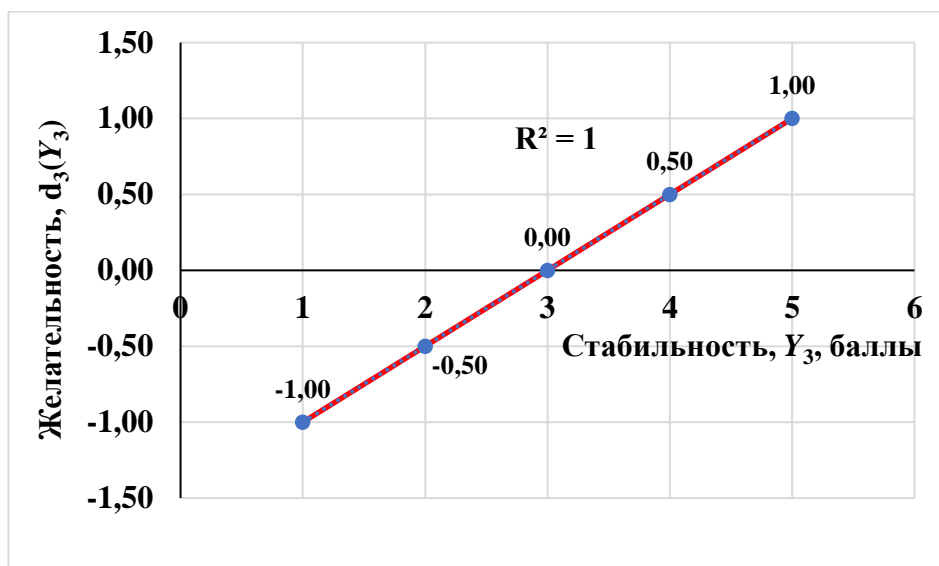


Рисунок 3.4 – Графическая интерпретация функции желательности стабильности раствора

2. Расчет обобщенного показателя желательности (D) как среднего геометрического от частных функций: $D = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3)^{1/3}$. Критерий D изменяется от 0 (полностью неудовлетворительный состав) до 1 (идеальный состав).

Определим обобщенный критерий желательности (D) [2]:

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot d_3)^{1/3} \rightarrow \max.$$

Эксперименты, проведенные параметрами опыта №8, приведенными в таблице 3.5 (x_1 (ПАВ) = 5% масс.; x_2 (бустер) = 6% масс.; x_3 (комплексон) = 3% масс.; x_4 (ингибитор) = 1,5% масс.), позволили получить следующие значения выходных параметров: $Y_1 = 91,8\%$ (моющая способность); $Y_2 = 0,045$ г/м²·ч (коррозионная активность); $Y_3 = 4,5$ баллов (стабильность раствора).

Рассчитаем частные функции желательности.

– Для моющей способности ($Y_1 = 91,8\%$)

$$d_1(Y_1) = \exp[-\exp(-(Y_1 - 80)/5)];$$

$$(91,8 - 80)/5 = 11,8/5 = 2,36;$$

$$\exp(-2,36) = 0,094;$$

$$\exp(-0,094) = 0,91, \text{ следовательно, } d_1(Y_1) = 0,91.$$

– Для коррозионной активности ($y_2 = 0,045$)

$$d_2(Y_2) = \exp[-\exp(-(0,1 - Y_2)/0,02)];$$

$$(0,1 - 0,045)/0,02 = 0,055/0,02 = 2,75;$$

$$\exp(-2,75) = 0,064;$$

$$\exp(-0,064) = 0,938, \text{ следовательно, } d_2(Y_2) = 0,938.$$

– Для стабильности ($Y_3 = 4,5$)

$$d_3(Y_3) = (Y_3 - 3)/2 = (4,5 - 3)/2 = 1,5/2 = 0,75, \text{ следовательно, } d_3(Y_3) = 0,75.$$

Тогда обобщенная желательность:

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times d_3(Y_3))^{1/3} = (0,91 \times 0,938 \times 0,75)^{1/3} = 0,64^{1/3} = 0,862.$$

Следовательно, $D = 0,862$.

Сравнительный анализ изученных параметров приведен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Сравнительный анализ изученных параметров

Параметр	Значение	$d_i(Y_i)$	Интерпретация
Моющая способность, (Y_1)	91,8%	0,910	Очень хорошо
Коррозионная активность, (Y_2)	0,045 г/м ² ·ч	0,938	Отлично
Стабильность, (Y_3)	4,5 балла	0,750	Хорошо
Обобщенный показатель, D	–	0,862	Высокий уровень

Визуализация полученных результатов приведена на рисунке 3.5.

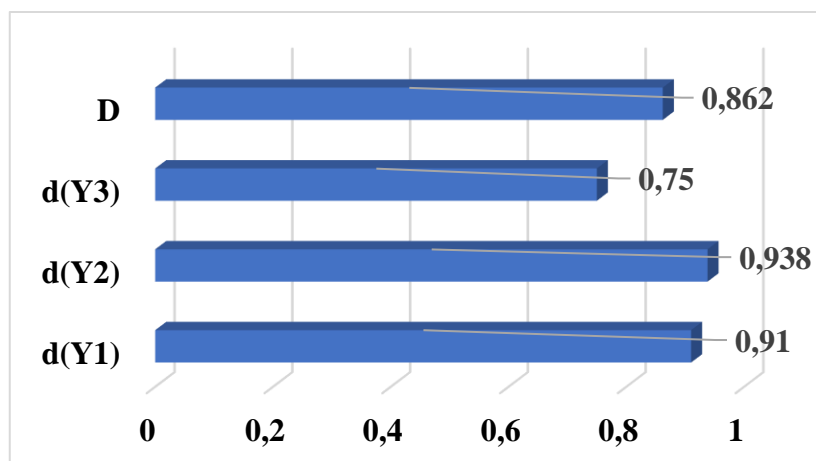


Рисунок 3.5 – Частные функции (для Y_1 , Y_2 , Y_3) и обобщенный показатель желательности

Из рисунка 3.5 видно, что состав обладает достаточно высоким значением обобщенного показателя желательности. Это подтверждает, что состав №8 (таблица 3.5) имеет высокий потенциал для практического применения.

3. Построение поверхности отклика для функций Y_1 , Y_2 , Y_3 в пространстве двух наиболее значимых факторов (концентрации ПАВ x_1 и щелочного бустера x_2) при фиксированных оптимальных значениях других факторов.

Получены математические модели для всех откликов:

– для моющей способности (Y_1):

$$Y_1 = 21,8 + 4,83x_1 + 2,7x_2 + 1,7x_3 + 1,9x_4 + 0,5x_1x_2 + 1,6x_1x_4,$$

– для коррозионной активности (Y_2):

$$Y_2 = 5,91 - 1,1x_1 - 3,5x_4 + 1,25x_2 - 0,8x_1x_4,$$

– для стабильности раствора (Y_3):

$$Y_3 = 2,3 + 0,6x_1 + 0,5x_3 - 0,3x_2.$$

Нашли оптимальные значения для $x_3 = 2$ и $x_4 = 1$ (из предыдущего анализа).

Подставим эти значения в модели откликов.

Тогда модели преобразуются в функции только от x_1 и x_2 :

$$Y_1 = 21,1 + 3,43x_1 + 2,7x_2 + 0,5x_1x_2;$$

$$Y_2 = 2,41 - 1,8x_1 + 1,25x_2;$$

$$Y_3 = 3,0 + 0,6x_1 - 0,3x_2.$$

На рисунках В.5, В.6 и В7 (приложение В) приведены поверхности отклика для функций Y_1 , Y_2 , Y_3 .

Анализ поверхностей отклика выявил область с максимальными значениями обобщенной желательности ($D \geq 0,85$). Ядро этой области соответствует следующим диапазонам концентраций: ПАВ – 5,0-6,0% масс., щелочной бустер – 6,5-7,5% масс. В качестве оптимальной рецептуры выбираем состав, соответствующий максимальному значению $D = 0,89$:

- синергетическая смесь ПАВ (Н-1 : А-2 = 3:1): 5,5% масс.;
- щелочной бустер (метасиликат натрия): 7,0% масс.;
- комплексообразующая система (НТА : цитрат натрия = 2:1): 3,0% масс.;
- ингибиторная система (тетраборфосфат калия): 1,2% масс.;
- пеногаситель (полидиметилсилоксан): 0,2% масс.;
- вода дистиллированная: до 100%.

Для всесторонней оценки качества оптимизированного состава было прове-

дено определение его основных физико-химических и функциональных свойств:

1. Определили равновесное поверхностное натяжение 2%-го водного раствора оптимизированного моющего состава методом отрыва кольца на аналоговом тензиометре К6 (рисунок 3.6) производства немецкой компании KRUSS, основанным на измерении силы, необходимой для отрыва платиновой проволочной рамки (кольца) от поверхности жидкости.



Рисунок 3.6 – Аналоговый тензиометр К6

Эта сила максимального натяжения пропорциональна поверхностному натяжению жидкости и определяется по формуле [57]:

$$\sigma = F / (2 \times L),$$

где: σ – поверхностное натяжение, Н/м;

F – максимальная сила, зафиксированная при отрыве кольца, Н;

L – суммарная длина периметра отрыва (для кольца $L = 2 \times \pi \times D$, где D – средний диаметр кольца), м.

Тензиометр К6 откалиброван таким образом, что показания стрелки на шкале непосредственно умножаются на постоянный коэффициент, который указан в паспорте тензиометра, для получения значения поверхностного натяжения в мН/м. Для К6 коэффициент составляет 0,166 мН/м на одно деление шкалы.

Порядок проведения замера:

- 1) В чистый сухой стаканчик налили примерно 20-30 мл 2%-го раствора. Стаканчик установили на подставку прибора под кольцом.
- 2) Плавно поднимали платформу со стаканчиком до тех пор, пока кольцо

не погрузится в жидкость на 2-3 мм ниже ее поверхности, затем медленно и плавно опускали платформу со стаканчиком. При этом через кольцо вытягивался мениск жидкости и стрелка прибора отклонялась.

3) Перед непосредственным отрывом кольца от жидкости стрелка достигала максимального значения, который фиксировали по шкале прибора. Показание умножали на коэффициент тензиометра (0,166 мН/м). Вносили табличную поправку на плотность жидкости (поправка Харкинса).

4) Измерение повторяли 3 раза и результаты усредняли. После каждого измерения кольцо промывали в дистиллированной воде.

Равновесное поверхностное натяжение 2%-го раствора оптимизированного моющего состава, измеренное на тензиометре К6, составило 29,8 мН/м, которое намного ниже поверхностного натяжения чистой воды (72,8 мН/м при 20°C), что подтверждает его высокую поверхностную активность, обеспечивающую хорошее смачивание и моющую способность.

2. Определили значение водородного показателя рН 2%-го водного раствора моющего средства с помощью рН-метра (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – рН-метр для растворов и жидкостей

Метод основан на измерении электродвижущей силы (ЭДС), возникающей в электрохимической ячейке, состоящей из измерительного стеклянного электрода и электрода сравнения. ЭДС напрямую связана с активностью ионов водорода (H^+) в растворе, которая выражается в виде рН-показателя. рН-метр является высокоомным вольтметром, который измеряет эту разность потенциалов и преобразует ее в значение рН, согласно уравнению Нернста [110].

Порядок проведения замера:

1) В чистый сухой стаканчик налили 30-50 мл приготовленного 2%-го раствора оптимизированного состава, опустили электрод в раствор и для обеспечения однородности осторожно перемешивали раствор во время измерения.

2) Зафиксировали установившееся значение рН на дисплее.

3) Измерение повторяли 3 раза с новой порцией раствора и результаты усредняли. Между измерениями электрод обязательно промывали.

Водородный показатель 2%-го водного раствора исследуемого моющего средства составляет 11,6 при температуре 20°C, что подтверждает его щелочную среду ($\text{pH} > 7$), и находится в оптимальном диапазоне для эффективного удаления загрязнений.

3. Моющая способность в стандартных условиях (температура раствора 50°C, продолжительность мойки 20 мин, иммерсионная мойка без перемешивания) подтвердила высокую эффективность оптимизированного состава: степень очистки составила 91,8 % (таблица 3.6).

4. Коррозионная активность определяет воздействие моющего средства на материал деталей и оборудования. Оценка коррозионной активности проводили по методике, приведенной в подразделе 2.4, результаты приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Результаты оценки коррозионной активности раствора по отношению к стали Ст3 и алюминиевого сплава АЛ4

Материал образцов	№№ образцов	Масса образцов, г		Скорость коррозии, K , г/м ² ·ч	
		до экспозиции, m_0	после экспозиции, m_1	образца	средняя по трем образцам
Сталь Ст3	1	23,5465	23,5460	0,053	0,052
	2	23,5723	23,5718	0,053	
	3	23,5348	23,5343	0,050	
Алюминиевый сплав АЛ4	1	7,9542	7,9540	0,017	0,018
	2	7,9487	7,9485	0,020	
	3	7,9511	7,9509	0,017	

Скорость коррозии (K , г/м²·ч) рассчитывается по формуле [20, 111]:

$$K = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t},$$

где m_0 и m_1 – масса образца до и после испытания, г;

S – площадь поверхности, м², $S = 2 ((0,05 \cdot 0,02) + (0,02 \cdot 0,003) + (0,05 \cdot 0,003)) = 2(0,001 + 0,00006 + 0,00015) = 0,00242$ м²;

t – время экспозиции, ч, $t = 4$ ч.

Коррозионная активность в отношении стали Ст3 составила 0,052 г/м²·ч, а для алюминиевого сплава АЛ4 – 0,018 г/м²·ч, что отвечает требованиям, предъявляемым моющим растворам.

5. Оценена физико-химическая стабильность 2%-го рабочего раствора оптимизированного моющего состава после выдержки в течение 24 часов в стандартных условиях по 5-балльной шкале, которая служит для визуальной и органолептической оценки склонности раствора к расслоению, выпадению осадка, изменению внешнего вида и образованию пены.

Метод основан на визуальном осмотре пробы раствора после 24-часовой выдержки и сравнении ее с исходным раствором. Оценка проводится по совокупности признаков, каждому из которых присваивается балл по 5-балльной шкале, где 5 – отлично (раствор абсолютно стабилен), 1 – неудовлетворительно (раствор полностью непригоден).

Порядок проведения оценки [62]:

1) Налили примерно 100 мл свежеприготовленного раствора в первый мерный цилиндр, плотно закрыли пробкой, сделали отметку «24 часа» и оставили в защищенном от прямых солнечных лучей месте при комнатной температуре на 24 часа.

2) Через 24 ч из такого же объема свежеприготовленного раствора во втором мерном цилиндре приготовили эталон для сравнения, отметили «0 часов» и провели оценку пробы «24 часа» в сравнении с пробой «0 часов». Аккуратно, не встряхивая цилиндр с пробой «24 часа», поставили его на лист белой бумаги и визуально оценили:

- наличие расслоения (появление слоев разной плотности или мутности);
- изменение прозрачности/мутности по всему объему;

- наличие осадка на дне.

3) Для оценки повторного диспергирования аккуратно 3 раза перевернули на 180° и обратно цилиндр с пробой «24 часа» и определили:

- легкость и однородность повторного перемешивания;
- исчезновение осадка и расслоения.

4) Для оценки пенообразования перелили примерно 50 мл из цилиндра «24 часа» в чистый сухой химический стакан, а затем обратно в цилиндр. Энергично встряхнули цилиндр в вертикальном положении 10 раз и определили:

- высоту пены сразу после встряхивания;
- стойкость пены (время, за которое пена разрушится до половины своей первоначальной высоты).

5) Для присвоения общего балла раствору воспользовались таблицей 3.12.

Таблица 3.12 – Критерии для оценки стабильности раствора оптимизированного состава

Балл	Качественная оценка	Критерии
1	2	3
5	Отлично	Абсолютно стабилен. Расслоение, осадок, помутнение отсутствуют. После 24 часов раствор идентичен свежеприготовленному. Легко и полностью диспергируется при легком взбалтывании. Пенообразование соответствует исходному раствору.
4	Хорошо	Стабилен. Возможно незначительное помутнение. Осадок и расслоение отсутствуют. Легко диспергируется при легком взбалтывании. Пенообразование незначительно снижено.
3	Удовлетворительно	Умеренно стабилен. Заметное помутнение или появление незначительного рыхлого осадка (высота < 5% от объема жидкости). Легко диспергируется при легком взбалтывании до однородного состояния. Пенообразование умеренно снижено.

1	2	3
2	Неудовлетворительно	Нестабилен. Явное расслоение и/или значительный осадок (высота 5-15% от объема). Для диспергирования требуется интенсивное встряхивание, может оставаться взвесь. Пенообразование значительно ухудшено, пена нестойкая.
1	Плохо	Полностью нестабилен. Сильное расслоение на фазы, плотный и значительный осадок (высота > 15% от объема). Раствор не диспергируется до однородного состояния даже при интенсивном перемешивании (хлопья, сгустки). Пенообразование практически отсутствует.

Раствор показал оценку 4,6 по 5-балльной шкале. После 24-часовой выдержки наблюдается незначительное помутнение без выпадения осадка. Он легко перемешивается, пенообразование соответствует норме. Начальная высота пены составила 45 мм, стойкость пены (время, за которое пена разрушится до половины своей первоначальной высоты) – 25 с.

Раствор демонстрирует хорошую стабильность и сохраняет свои функциональные свойства в течение 24 часов. Умеренные пенообразующие свойства позволяют применять состав в циркуляционных системах и в системах со струйным воздействием раствора на загрязнения.

6. Была исследована зависимость моющей способности от температуры (температурная эффективность), результаты приведены в сводной таблице 3.13 и таблице В.3 (приложение В).

Таблица 3.13 – Зависимость моющей способности раствора от температуры

Температура, °С	30	40	50	60
Степень очистки, %	71,3	85,4	94,6	93,5

Установлено, что состав сохраняет высокую эффективность (не менее 85%) даже при снижении температуры до 40°С, что является ключевым преимуществом с точки зрения ресурсосбережения.

Для объективной оценки проведено сравнительное тестирование оптимизированной рецептуры с двумя распространенными коммерческими моющими средствами для технической мойки: «Лабомид-203» и «МС-8» (таблица 3.14).

Таблица 3.14 – Сравнительные характеристики моющих составов

Параметр	Оптимизированная рецептура	Лабомид-203	МС-8
Моющая способность при 50°C, %	94,6	40,55	39,1
Моющая способность при 40°C, %	85,4	56,2	58,8
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

Данные таблицы 3.14 наглядно демонстрируют преимущества оптимизированной рецептуры: она превосходит аналоги по совокупности ключевых показателей – моющей способности, особенно в низкотемпературной области, и коррозионной безопасности.

Таким образом, в результате проведенной многокритериальной оптимизации была получена и всесторонне охарактеризована моющая композиция, обладающая сбалансированными физико-химическими и функциональными свойствами.

Оптимизированная рецептура сочетает высокую моющую способность в мягких температурных условиях с низкой коррозионной активностью и удовлетворительными технологическими характеристиками, что подтверждает эффективность примененного научного подхода и соответствие разработки целям ресурсосбережения.

Данный состав принимается в качестве базового для дальнейших исследований.

3.5 Выводы по главе 3

Проведенные в третьей главе экспериментальные исследования по получению и оптимизации моющей композиции позволяют сформулировать следующие основополагающие выводы:

1. На основе теоретического анализа физико-химических механизмов моющего действия разработана стратегия создания многофункциональной композиции, основанная на принципе синергетического подхода. Установлена необходимость комплексного воздействия на все структурные компоненты конгломератных загрязнений (смачивание, пенетрирование, диспергирование, эмульгирование, стабилизация дисперсной фазы), что предопределило выбор основных функциональных компонентов: синергетической смеси ПАВ, щелочных бустеров, комплексонов и ингибитора коррозии.

2. 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. Получены адекватные математические модели, позволившие выявить значимые факторы и эффекты их взаимодействия. Установлено, что концентрация синергетической смеси ПАВ оказывает наиболее сильное положительное влияние на моющую способность (коэффициент +4,83), а также выявлен положительный эффект взаимодействий между ПАВ и щелочным бустером (+0,5), между ПАВ и ингибитором коррозии (+1,6), свидетельствующий об их синергизме.

3. Путем многокритериальной оптимизации с использованием функции желательности Харрингтона определена оптимальная рецептура моющего средства, обеспечивающая компромисс между высокой моющей способностью и низкой коррозионной активностью. Рекомендованный состав включает: синергетическую смесь ПАВ (5,5% масс.), метасиликат натрия (7,0% масс.), комплексообразующую систему (3,0% масс.) и ингибиторную систему (1,2% масс.).

4. Комплексная характеристика физико-химических свойств оптимизированной рецептуры подтвердила ее высокую функциональную эффективность. Установлено, что состав характеризуется низким поверхностным натяжением (29,8 мН/м), сохраняет высокую моющую способность (94,6%) при температуре 50°C и демонстрирует эффективность не менее 85% при снижении температуры до 40°C. Коррозионная активность в отношении стали Ст3 составила 0,052 г/м²·ч, а для алюминиевого сплава АЛ4 – 0,018 г/м²·ч.

5. Сравнительный анализ с коммерческими аналогами продемонстрировал преимущества полученной композиции по совокупности ключевых показателей. Установлено, что оптимизированная рецептура превосходит аналоги по моющей способности в низкотемпературной области (40°C) на 36-38% при значительно более низкой коррозионной активности.

Таким образом, в результате проведенных исследований получена и всесторонне охарактеризована моющая композиция, сочетающая высокую функциональную эффективность в низких температурных условиях с незначительным коррозионным воздействием на материалы. Полученные результаты подтверждают выполнение задач, поставленных в главе, и создают научно-техническую базу для создания и экспериментального обоснования ресурсосберегающей технологии мойки в следующей главе работы.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОЙКИ. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

4.1 Исследование кинетики процесса мойки в зависимости от концентрации моющего средства, температуры и гидродинамического режима

Создание ресурсосберегающей технологии требует не только формирования эффективного моющего средства, но и оптимизации параметров его применения. Исследование кинетики процесса мойки является фундаментальной основой для установления рациональных режимов эксплуатации, позволяющих достигать требуемого качества очистки при минимальных энергозатратах и продолжительности операции. Настоящий раздел посвящен изучению влияния ключевых технологических параметров – концентрации моющего средства, температуры раствора и гидродинамического режима – на скорость и эффективность удаления загрязнений с поверхностей деталей.

Для изучения кинетики процесса мойки использовалась универсальная лабораторная установка, описанная в подразделе 2.4. В качестве объектов исследования применялись стандартизированные образцы из стали Ст3 с нанесенным модельным загрязнением установленного состава. Моющий процесс проводили с применением оптимизированной композиции, полученной в главе 3.

Исследование проводилось путем варьирования следующих параметров:

- 1) концентрация моющего средства: 1,0; 2,0; 3,0; 5,0% масс.;
- 2) температура раствора: 30, 40, 50, 60°C;
- 3) гидродинамический режим:
 - иммерсионный без перемешивания;
 - иммерсионный с перемешиванием;
 - струйная обработка (давление 0,3 МПа).

Контроль степени очистки осуществлялся гравиметрическим методом через фиксированные промежутки времени мойки (2, 5, 10, 15, 20, 30 минут). Для каждого режима проводилось не менее трех параллельных опытов. Полученные кинетические кривые обрабатывались методами математической статистики.

Результаты экспериментов по изучению влияния концентрации моющего средства в растворе на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при температуре раствора 50°C приведены в сводной таблице 4.1, таблице В.4 (приложение В) и на рисунке 4.1.

Таблица 4.1 – Влияние концентрации раствора на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при температуре раствора 50°C

Концентрация раствора, %масс.	Степень очистки, %					
	через 2 мин., y2	через 5 мин., y5	через 10 мин., y10	через 15 мин., y15	через 20 мин., y20	через 30 мин., y30
1	23,6	34,2	41,7	60,2	73,5	85,2
2	30,2	41,7	58,8	72,3	87,2	91,2
3	37,7	53,9	69,4	86,3	91,2	94,8
5	41,3	57,8	72,5	89,1	93,7	96,4

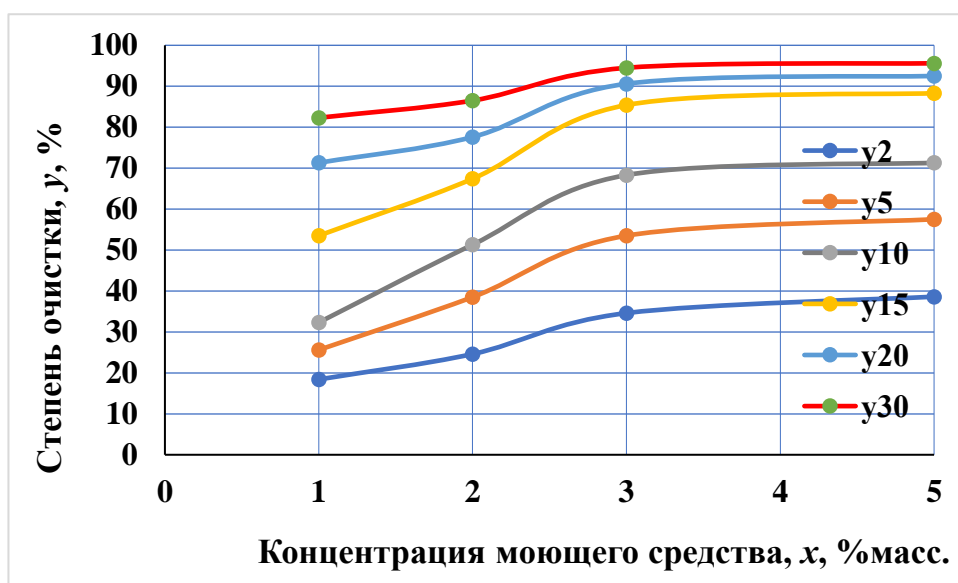


Рисунок 4.1 – Влияние концентрации моющего средства на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при температуре раствора 50°C: y2 – степень очистки через 2 мин. мойки; y5 – степень очистки через 5 мин. мойки; y10 – степень очистки через 10 мин. мойки; y15 – степень очистки через 15 мин. мойки; y20 – степень очистки через 20 мин. мойки; y30 – степень очистки через 30 мин. мойки

Анализ кинетических кривых для различных концентраций моющего средства (рисунок 4.1), позволил выявить характерные закономерности:

1. Начальная стадия процесса мойки (первые 5-10 мин.) характеризуется максимальной скоростью очистки, что объясняется быстрым смачиванием и пенетрацией раствора в поверхностные слои загрязнения. При этом увеличение концентрации с 1% до 3% приводит к существенному росту начальной скорости процесса мойки – с 3,2 до 6,8 %/мин.

2. Критическая концентрация, выше которой дальнейшее увеличение содержания моющего средства не дает значимого прироста эффективности, составляет 3%. При повышении концентрации до 5% прирост моющей способности за 20 минут составляет не более 2-3% относительно показателей при 3%-й концентрации.

3. Предельная степень очистки после 30 минут экспозиции при концентрации 3% составляет 94,5%, в то время как при концентрации 1% этот показатель не превышает 82,3%.

Объяснение наблюдаемых закономерностей заключается в достижении ККМ и насыщении адсорбционных слоев на границах раздела фаз. Дальнейшее увеличение концентрации приводит лишь к росту числа мицелл в объеме раствора без усиления моющего действия на поверхности раздела.

Результаты экспериментов по определению влияния температуры раствора на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при концентрации моющего средства 3 %масс приведены в сводной таблице 4.2, таблице В.5 (Приложение В) и на рисунке 4.2.

Таблица 4.2 – Влияние температуры раствора на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при концентрации моющего средства 3 %масс.

Температура раствора, °С	Степень очистки, %					
	через 2 мин., у2	через 5 мин., у5	через 10 мин., у10	через 15 мин., у15	через 20 мин., у20	через 30 мин., у30
30	23,6	34,2	41,7	60,2	73,5	85,2
40	30,2	41,7	58,8	72,3	87,2	91,2
50	37,7	53,9	69,4	86,3	91,2	94,8
60	41,3	57,8	72,5	89,1	93,7	96,4

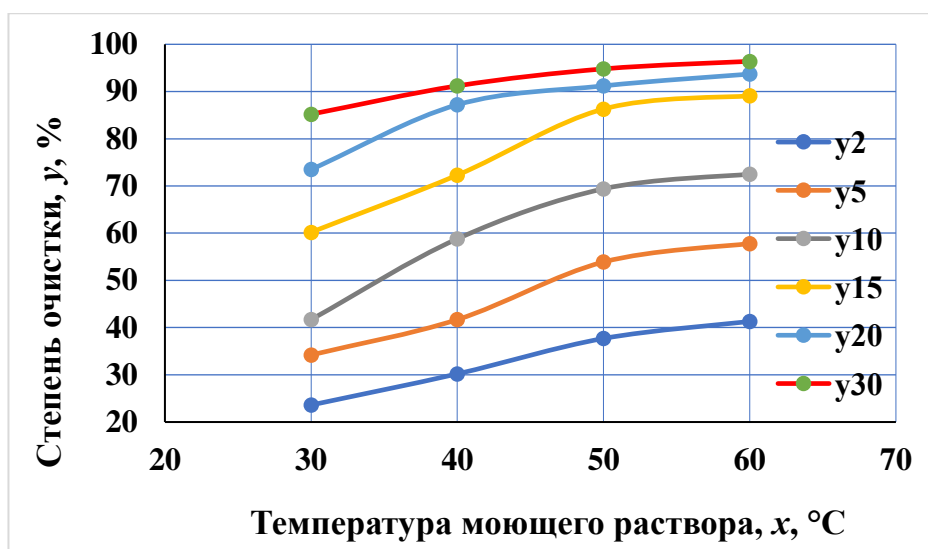


Рисунок 4.2 – Влияние температуры моющего средства на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при концентрации моющего средства 3 %масс.: y2 – степень очистки через 2 мин. мойки; y5 – степень очистки через 5 мин. мойки; y10 – степень очистки через 10 мин. мойки; y15 – степень очистки через 15 мин. мойки; y20 – степень очистки через 20 мин. мойки; y30 – степень очистки через 30 мин. мойки

Энергия активации (E_a) процесса является мощным аргументом для количественной оценки и оптимизации процесса мойки [82].

Энергию активации процесса рассчитали по уравнению Аррениуса в температурном диапазоне 30-60°C.

Уравнение Аррениуса связывает константу скорости химической реакции (k) с температурой (T) и энергией активации (E_a) [4]:

$$k = A \cdot e^{(-E_a/(R \cdot T))},$$

где: k – константа скорости процесса мойки;

A – предэкспоненциальный множитель (частотный фактор), характерный для конкретного процесса;

E_a – энергия активации (Дж/моль или кДж/моль). Она показывает, насколько чувствителен процесс мойки к изменению температуры раствора;

R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К));

T – абсолютная температура (в Кельвинах);

e – основание натурального логарифма.

Для практических расчетов удобнее использовать линейную форму этого уравнения [4]:

$$\ln(k) = \ln(A) - (E_a/R) \cdot (1/T).$$

Это уравнение прямой линии вида $y = b + a \cdot x$, где: $y = \ln(k)$; $x = 1/T$, наклон прямой (a) = $-E_a/R$, свободный член (b) = $\ln(A)$.

Процесс удаления загрязнения при мойке – это комплекс физико-химических процессов (смачивание, набухание, эмульгирование, гидролиз, диффузия). Их суммарная скорость зависит от температуры. Энергия активации (E_a) количественно характеризует «энергетический барьер» этого общего процесса.

Так как «константа скорости мойки» (k) неочевидна, ее заменяют измеряемым параметром, характеризующим эффективность мойки. В нашем случае мы заменили скоростью удаления загрязнения, которую определили как степень очистки (в %) за фиксированное время (мин.) при разных температурах. Эта скорость (%/мин.) принимается как скорость процесса мойки (V), которая будет пропорциональна k .

$V_1 = 2,41$ %/мин. – скорость при температуре раствора 30°C (или $303,15$ К);

$V_2 = 2,59$ %/мин. – скорость при температуре раствора 40°C (или $313,15$ К);

$V_3 = 3,13$ %/мин. – скорость при температуре раствора 50°C (или $323,15$ К);

$V_4 = 3,24$ %/мин. – скорость при температуре раствора 60°C (или $333,15$ К).

Принимаем, что $k_1 \approx V_1$, $k_2 \approx V_2$, $k_3 \approx V_3$, $k_4 \approx V_4$.

Подготовительные расчеты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Подготовительные расчеты

Температура раствора, Т		1/T (K ⁻¹), (x)	k ≈ V (%/мин)	ln(k), (y)
°C	К (Кельвин)			
30	303,15	0,003299	2,41	0,8796
40	313,15	0,003193	2,59	0,9525
50	323,15	0,003095	3,13	1,1406
60	333,15	0,003002	3,24	1,1763

График Аррениуса строится с координатами ($x = 1/T$, $y = \ln(k)$) (рисунок 4.3).

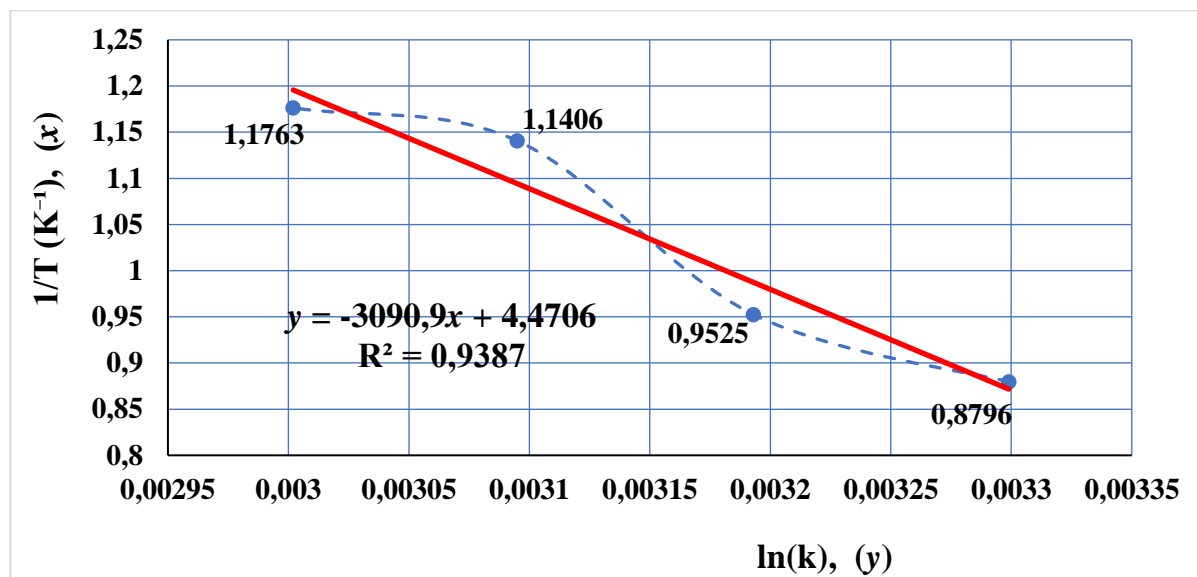


Рисунок 4.3 – График Аррениуса для процесса мойки

Через полученные точки проводили линию наилучшего соответствия (методом наименьших квадратов). Наклон этой линии (a) равен $-E_a/R$.

Расчет энергии активации: $E_a = -\text{наклон} \cdot R = -a \cdot 8,314$ (результат в Дж/моль, обычно делят на 1000 для получения кДж/моль).

Аппроксимирующая прямая имеет уравнение:

$$y = -3090,9x + 4,4706.$$

Тогда наклон $a = -3090,9$ К.

Рассчитываем E_a :

$$E_a = -a \cdot R = -(-3090,9) \cdot 8,314 = 3090,9 \cdot 8,314 \approx 25697,7 \text{ Дж/моль} \approx 25,7 \text{ кДж/моль}.$$

Энергия активации процесса мойки в нашем случае составляет $\sim 25,7$ кДж/моль.

Если $E_a > 50$ кДж/моль, то процесс мойки сильно зависит от температуры, то есть повышение температуры значительно ускорит мойку. Если $E_a < 20$ кДж/моль, то процесс мойки слабо зависит от температуры, то есть механическое воздействие важнее повышения температуры раствора [102].

Таким образом, знание энергии активации процесса мойки позволяет прогнозировать скорость мойки при других температурах (в рамках изученного диапазона) и оптимизировать энергозатраты.

Исследование температурной зависимости процесса мойки выявило:

1. Энергия активации процесса, рассчитанная по уравнению Аррениуса в

температурном диапазоне 30-60°C, составляет $E_a \approx 25,7$ кДж/моль и показывает, что оптимизированный состав демонстрирует низкую функциональную зависимость от 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. Преимущественный вклад вносит синергия многокомпонентного состава, где целенаправленный подбор и сбалансированное соотношение поверхностно-активных веществ, комплексообразователей, щелочных агентов и функциональных добавок обеспечивают высокую термодинамическую и кинетическую активность системы в широком диапазоне условий.

Ключевым отличительным признаком данного композита является его высокая эффективность, которая реализуется преимущественно за счет химико-физической рецептуры, что минимизирует потребность в энергозатратных внешних усилителях процесса мойки.

2. Температурный оптимум процесса находится в диапазоне 50-60°C. Дальнейшее повышение температуры экономически нецелесообразно из-за экспоненциального роста энергозатрат при незначительном приросте эффективности.

3. Важным практическим результатом является сохранение высокой эффективности моющего средства при пониженных температурах: при 40°C степень очистки за 20 минут составляет 87,2%, а при 35°C – 73,5%. Это позволяет рекомендовать рабочий температурный диапазон 40-50°C для практического применения с целью энергосбережения.

Эксперименты по изучению влияния гидродинамического режима на кинетику процесса мойки проведены при температуре 50°C и концентрации раствора оптимизированного состава 3% масс. в режимах иммерсионной мойки без перемешивания, с перемешиванием, струйной обработки под давлением 0,3 МПа и комбинированной мойки, которая представляет собой последовательное применение иммерсионного режима без перемешивания (5 минут), иммерсионного

режима с перемешиванием (5 минут), струйной обработки под давлением 0,3 Мпа (5 минут), результаты сведены в таблицы сводная 4.4 и В.6 (приложение В).

Таблица 4.4 – Влияние гидродинамического режима на кинетику процесса мойки при температуре раствора 50°C и концентрации оптимизированного состава 3% масс.

Продолжительность мойки, x, мин	Степень очистки, y, %			
	Иммерсионный		Струйный режим	Комбинированный режим
	без перемешивания	с перемешиванием		
2,0	22,8	33,8	35,9	–
5,0	35,7	48,7	51,8	36,1
10,0	56,6	68,3	73,6	87,6
15,0	70,3	81,5	87,4	98,2
20,0	78,9	91,2	92,3	–
30,0	86,3	94,8	95,8	–

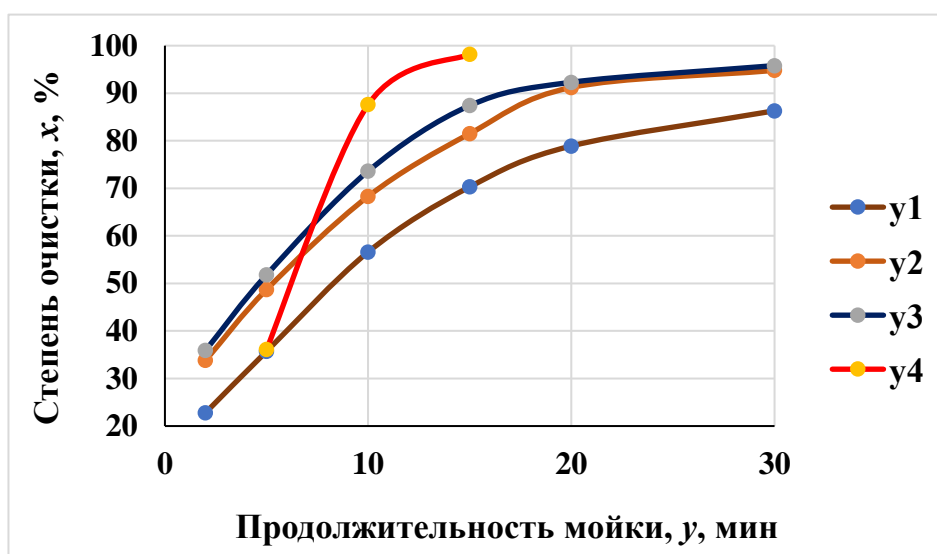


Рисунок 4.4 – Кинетические кривые для различных гидродинамических режимов мойки при температуре раствора 50°C и концентрации оптимизированного состава 3% масс.: y_1 – иммерсионный без перемешивания; y_2 – иммерсионный с перемешиванием; y_3 – струйный режим; y_4 – комбинированный режим

Сравнительный анализ кинетических кривых для различных гидродинамических режимов (рисунок 4.4) демонстрирует существенные различия в скорости и механизме очистки:

1. Иммерсионный режим без перемешивания характеризуется классической кинетикой с постепенным замедлением скорости процесса. Предельная степень очистки достигается за 25-30 минут и составляет 86,3%.

2. Иммерсионный режим с перемешиванием обеспечивает интенсификацию процесса на начальной стадии за счет механического воздействия. Скорость очистки в первые 5 минут возрастает в 1,5 раза по сравнению с иммерсионным режимом. Предельная степень очистки 94,8% достигается за 20-25 минут.

3. Струйный режим демонстрирует высокую эффективность против механически связанных загрязнений. Кинетическая кривая имеет практически линейный характер до 10-й минуты процесса, после чего наблюдается резкое замедление, связанное с переходом к удалению прочносвязанных компонентов. Предельная степень очистки 95,8% также достигается за 20-25 минут.

4. Наиболее значимые результаты получены при исследовании комбинированного режима обработки. Последовательное применение иммерсионного режима без перемешивания (5 минут), иммерсионного режима с перемешиванием (5 минут), струйной обработки под давлением 0,3 Мпа (5 минут) позволяет достигать степени очистки 98,2% за суммарное время 15 минут. При этом энергозатраты снижаются на 35-40% по сравнению с отдельным применением этих методов.

Механизм синергии объясняется последовательным воздействием на различные компоненты загрязнения: иммерсионный режим без перемешивания характеризуется быстрым смачиванием и пенетрацией раствора в глубинные слои загрязнения, что ослабляет его адгезионно-когезионные свойства, иммерсионный режим с перемешиванием эффективно разрушает связи загрязнения на границе с подложкой, а струйная обработка обеспечивает удаление диспергированных частиц минеральной компоненты.

На основе анализа кинетических закономерностей сформулированы практические рекомендации по выбору рациональных режимов мойки:

1. Оптимальная концентрация моющего средства составляет 2-3% в

зависимости от степени загрязнения.

2. Рабочий температурный диапазон 40-50°C обеспечивает баланс между эффективностью и энергозатратами.

3. Комбинированный режим обработки (иммерсионный режим без перемешивания + иммерсионный режим с перемешиванием + струйное воздействие) является наиболее эффективным для сложных загрязнений.

4. Продолжительность процесса не должна превышать 15-20 минут для большинства типов загрязнений.

4.2 Разработка математической модели процесса мойки, адекватно описывающей экспериментальные данные

Полученные в предыдущем разделе экспериментальные данные по кинетике процесса мойки создают необходимую основу для разработки математической модели. Создание адекватной модели является ключевым этапом в оптимизации технологии, поскольку позволяет не только описывать наблюдаемые явления, но и прогнозировать поведение системы за пределами исследованного диапазона параметров, а также служить основой для автоматизации процесса. Настоящий раздел посвящен разработке и верификации математической модели, описывающей процесс удаления конгломератных загрязнений с учетом основных технологических параметров.

Анализ кинетических кривых, представленных в разделе 4.1, показывает, что процесс мойки характеризуется нелинейной зависимостью степени очистки от времени с выраженным участком насыщения. Такой характер кинетики свидетельствует о сложном, многостадийном механизме процесса, включающем последовательные и параллельные стадии: диффузию моющего раствора в слой загрязнения, разрушение адгезионных связей, диспергирование и эмульгирование компонентов загрязнения, их транспорт в объем раствора.

В соответствии с количеством параметров процесса изучаемой мойки использовали математический метод планирования экспериментов плана $N = 2^4$, который требует всего 16 вариантов в одной серии опытов.

В нашем случае одновременно меняли концентрацию ПАВ (x_1), концен-

трацию ингибитора (x_2), температуру раствора (x_3) и продолжительность (x_4).

Имитационная модель полного факторного эксперимента плана $N = 2^4$ выражается уравнением:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4$$

где y – выходной параметр изучаемого процесса мойки (степень очистки);

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}, b_{123}, b_{124}, b_{134}, b_{234}, b_{1234}$ – коэффициенты;

x_1, x_2, x_3, x_4 – параметры мойки (факторы).

Полученные значения параметров мойки «приняты за основной уровень варьирования факторов, а варьирование переменных производили на двух уровнях, условно обозначаемых «+1» и «-1» или символами «+» и «-».

Составляли матрицу планирования и план четырехфакторного эксперимента» [105] (таблицы 4.5 и 4.6).

Таблица 4.5 – Матрица планирования

Наименование	Значения переменных			
	Концентрация		Температура раствора, x_3	Время мойки, x_4
	ПАВ, x_1	ТБФК, x_2		
Основной уровень, O_{x_i}	5,5	1,2	50,0	15,0
Интервал варьирования, λ_i	1,5	0,5	10,0	3,0
Верхний уровень «+»	7,0	0,7	60,0	18,0
Нижний уровень «-»	4,0	1,7	40,0	12,0

Эксперименты проводились с образцами размерами $50 \times 100 \times 2,0$ мм. Мойка осуществлялась комбинированным способом. Подготовка образцов, включая нанесение модельного загрязнения, замеры размеров и взвешивание образцов, проводилась в соответствии с утверждённой методикой.

Полученные данные (сводная таблица 4.7 и таблица В.7 (приложение В)) использовались для расчёта дисперсий и последующего регрессионного анализа.

Таблица 4.6 – План многофакторного эксперимента $N = 2^4$

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1
9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1
11	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Общее число опытов: $N = 16$.

Таблица 4.7 – Результаты экспериментов

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Степень очистки, %	25,8	38,7	31,6	48,3	31,9	57,3	45,8	82,7	33,3	62,5	42,2	66,8	47,9	87,8	55,6	98,4
Дисперсия построчная, S_j^2	0,65	0,65	0,20	0,75	0,95	0,15	0,30	0,35	0,35	0,35	0,20	0,35	1,15	0,65	0,35	0,20

$$S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y}_j)^2}{m-1},$$

$$\sum_{j=1}^m S_j^2 = 7,60.$$

Используя критерий Кохрэна, рассчитана воспроизводимость экспериментов:

$$G_p = \frac{S_{j \max}^2}{\sum_{j=1}^m S_j^2}$$

$$G_p = 1,15/7,6 = 0,151.$$

Для количества экспериментов $N = 16$ при уровне надежности $\gamma = 0,95$:

$$G_{\text{табл.}} \approx 0,252.$$

Тогда $G_p = 0,151 < G_{\text{табл.}} \approx 0,252$.

«Это подтверждает, что результаты экспозиций однородны, значит, можно приступить к определению неизвестных коэффициентов уравнения регрессии» [90].

Коэффициенты регрессии определяются по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_n}{N},$$

где x_i – параметры процесса мойки;

N – число опытов.

$$y = 23,54 + 14,28 x_1 + 5,39 x_2 + 9,89 x_3 + 8,28 x_4 + 7,85 x_1 x_2 - 2,3 x_1 x_3 + 2,79 x_1 x_4 + 1,81 x_2 x_3 - 1,45 x_2 x_4 + 0,73 x_3 x_4 + 0,95 x_1 x_2 x_3 - 1,06 x_1 x_2 x_4 - 0,20 x_1 x_3 x_4 - 1,18 x_2 x_3 x_4 - 0,01 x_1 x_2 x_3 x_4.$$

Найденные таким образом коэффициенты уравнения регрессии необходимо оценить на статистическую значимость. Оценка производится по t -критерию Стьюдента вычислениями следующих показателей [85]:

а) дисперсии воспроизводимости:

$$S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^m S_j^2}{N} = \frac{7,60}{16} = 0,48;$$

б) дисперсии среднего значения:

$$[S_j^2] = \frac{S_j^2}{m} = \frac{0,48}{3} = 0,16;$$

в) дисперсии коэффициентов регрессии:

$$S^2\{b_i\} = \frac{[S_j^2]}{N} = \frac{0,16}{16} = 0,01;$$

г) ошибки коэффициентов регрессии:

$$S\{b_i\} = 0,1;$$

д) определены расчетные значения коэффициента Стьюдента: $t_0 = 235,4$; $t_1 = 142,8$; $t_2 = 53,9$; $t_3 = 98,9$; $t_4 = 82,8$; $t_{12} = 78,5$; $t_{13} = 23,0$; $t_{14} = 27,9$; $t_{23} = 18,1$; $t_{24} = 14,5$; $t_{34} = 7,3$; $t_{123} = 9,5$; $t_{124} = 10,6$; $t_{134} = 2,0$; $t_{234} = 11,8$; $t_{1234} = 0,1$.

Из таблиц при уровне статистической значимости $p = 0,05$ и числе степеней свободы $v = 16$ ($3 - 1$) = 32, определим табличное значение коэффициента Стьюдента. Оно равно $t_T = 2,04$. Сопоставим расчетные значения t_i с табличным $t_{\text{табл}}$. Неравенство $t_{\text{табл}} > t_i$ выполняется для t_{134} и t_{1234} . Следовательно, можно предположить, что коэффициенты b_{134} и b_{1234} статистически незначимы и их можно исключить из уравнения регрессии.

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

Адекватность финальной регрессионной модели оценивалась путём сравнения с исходными данными с использованием F-теста Фишера. Расчётное значение критерия определялось как отношение дисперсии адекватности к дисперсии среднего:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{[S_j^2]}.$$

Здесь $S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N-B} \cdot \sum (y_j - \hat{y}_j)^2$ характеризует отклонение прогнозов уточнённой модели от экспериментальных результатов, а $[S_j^2]$ представляет дисперсию среднего, рассчитанную по параллельным опытам. Полученные значения F_p сопоставлялись с табличным порогом $F_{\text{табл}}$ при уровнях значимости $v_1 = B - 1 = 14 - 1 = 13$ (степени свободы для коэффициентов модели) и $v_2 = N (m - 1) = 16 (3 - 1) = 32$ (степени свободы для ошибки воспроизводимости). Прогнозные значения \hat{y}_j вычислялись по упрощённому уравнению, из которого были исключены статистически незначимые члены.

Сумма $(y_j - \hat{y}_j)^2$ рассчитана в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Расчет суммы $(y_j - \hat{y}_j)^2$

№№ п/п	y_j	\hat{y}_j	$ y_j - \hat{y}_j $	$(y_j - \hat{y}_j)^2$
1	25,8	25,77	0,03	0,001
2	38,7	38,62	0,08	0,006
3	31,6	31,52	0,08	0,006
4	48,3	48,22	0,08	0,006
5	31,9	31,79	0,11	0,012
6	57,3	57,22	0,08	0,006
7	45,8	45,68	0,12	0,014
8	82,7	82,65	0,05	0,002
9	33,3	33,25	0,05	0,002
10	62,5	62,43	0,07	0,005
11	42,2	41,96	0,24	0,058
12	66,8	66,68	0,12	0,014
13	47,9	47,81	0,09	0,008
14	87,8	87,73	0,07	0,005
15	55,6	55,51	0,09	0,008
16	98,4	98,27	0,13	0,017
Сумма				0,173

Из таблицы 4.8 следует: $S_{ад}^2 = \frac{3 \cdot 0,173}{16-14} = 0,26$.

$[S_f^2] = 0,16$ (рассчитана ранее).

Расчетное значение критерия Фишера: $F_p = \frac{0,26}{0,16} = 1,622$.

«При $\nu_1 = B - 1 = 14 - 1 = 13$; $\nu_2 = N(m - 1) = 16(3 - 1) = 32$; $p = 0,05$ табличное значение будет» [89]: $F_{таб} = 2,05$.

$$F_p < F_{таб}.$$

Уравнение регрессии, после исключения незначимых членов, подтвердило адекватность модели.

На основе полученного уравнения регрессии можно сделать следующие выводы о влиянии технологических параметров на степень очистки (y):

Влияние отдельных факторов:

- концентрация ПАВ (x_1) имеет наибольший положительный вклад (+14,28), что делает её ключевым фактором повышения степени очистки;
- концентрация ТБФК (x_2) также положительно влияет (+5,39), но

слабее, чем ПАВ, что подтверждает его многофункциональность;

- температура раствора (x_3) и время мойки (x_4) оказывают существенное положительное влияние (+9,89 и +8,28 соответственно), что подтверждает важность теплового и временного факторов в процессе очистки.

Влияние двухфакторных взаимодействий:

- взаимодействие x_1x_2 (+7,85) демонстрирует синергию между концентрациями ПАВ и ТБФК: их совместное влияние значительно превышает сумму индивидуальных эффектов, что указывает на взаимное усиление моющих свойств при комбинировании реагентов;

- взаимодействие x_1x_3 (-2,3) показывает антагонизм: повышение температуры раствора в сочетании с высокой концентрацией ПАВ снижает эффективность очистки, возможно, из-за деструкции ПАВ или изменения его коллоидных свойств при нагреве;

- взаимодействие x_1x_4 (+2,79) имеет слабую положительную синергию, означающая, что увеличение времени мойки усиливает положительный эффект от высокой концентрации ПАВ;

- взаимодействие x_2x_3 (+1,81) имеет умеренную синергию, подтверждающую, что температура усиливает действие ТБФК;

- взаимодействие x_2x_4 (-1,45) имеет антагонизм, свидетельствующую, что длительная мойка при высокой концентрации ТБФК может снижать эффективность мойки (например, из-за вторичного осаждения загрязнений).

- взаимодействие x_3x_4 (+0,73) демонстрирует слабую синергию между температурой и продолжительностью мойки, их совместное увеличение даёт небольшой дополнительный эффект.

Влияние трёхфакторных взаимодействий:

- $x_1x_2x_3$ (+0,95) имеет слабую положительную синергию трёх ключевых параметров (ПАВ, ТБФК, температура), что указывает на возможность комплексной оптимизации этих факторов.

- $x_1x_2x_4$ (-1,06) проявляет антагонизм, так как при одновременном увеличении концентраций ПАВ, ТБФК и времени мойки возникает

отрицательный эффект, возможно, из-за перенасыщения раствора или образования трудноудаляемых плёнок.

– $x_2x_3x_4$ (-1,18) имеет антагонизм, потому что комбинация ТБФК, высокой температуры и длительной мойки снижает эффективность, что может быть связано с термической деградацией ТБФК или его взаимодействием с загрязнениями с образованием стойких комплексов.

Выводы:

– наибольшая синергия наблюдается для пары ПАВ-ТБФК (x_1x_2), что делает их совместное применение выгодным для повышения степени очистки;

– температура (x_3) в целом положительно влияет на степень очистки, но её взаимодействие с ПАВ (x_1x_3) является антагонистическим, что требует осторожности при выборе температурного режима для растворов с высокой концентрацией ПАВ;

– многофакторные взаимодействия (трёхфакторные) в основном носят антагонистический характер, что подчёркивает сложность системы, исключаящую оптимизацию более чем двух параметров одновременно, что может привести к снижению эффективности мойки.

Рекомендация для производства:

1. Увеличивать концентрации многофакторных взаимодействий совместно, используя их синергию.

2. Подбирать температуру раствора с учётом антагонизма с ПАВ, возможно, лучше использовать умеренную температуру нагрева раствора.

3. Избегать одновременного увеличения всех четырёх факторов из-за риска антагонистических эффектов в трёх- и четырехфакторных взаимодействиях.

На рисунке 4.5 приведена диаграмма влияния отдельных параметров мойки и их взаимодействий на повышение степени очистки деталей.

Из рисунка 4.5 отчетливо видно, что из всех многофакторных взаимодействий только взаимодействие ПАВ-ТБФК (x_1x_2) проявляет синергетические свойства в изучаемой технологии мойки, что подчеркивает многофункциональность ТБФК и хорошо согласуется с данными работы [35].

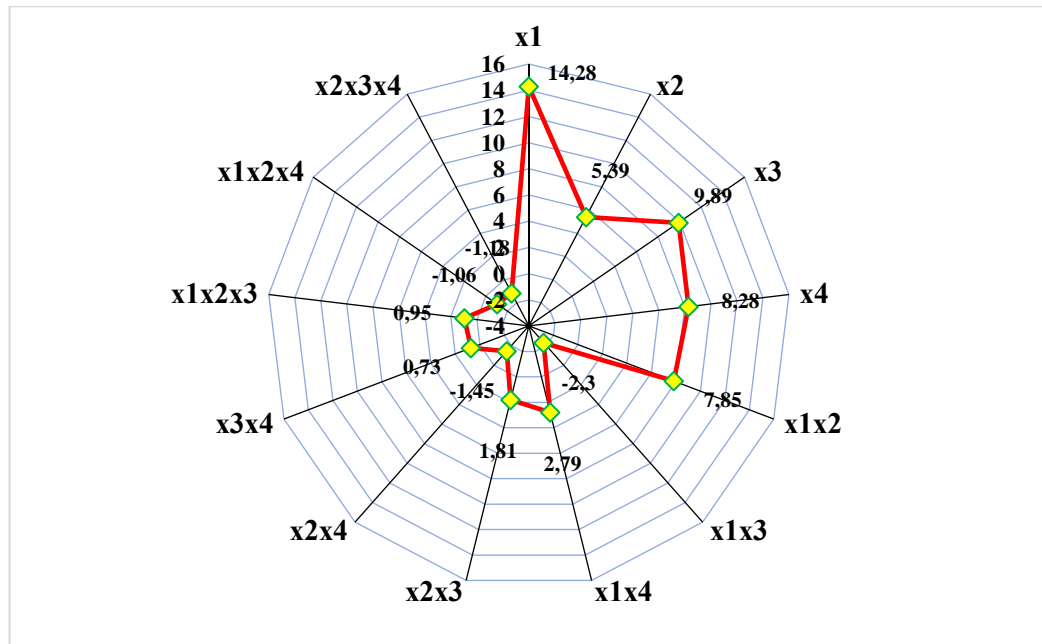


Рисунок 4.5 – Влияние отдельных параметров мойки и их взаимодействий на повышение степени очистки деталей

Таким образом, разработанная математическая модель адекватно описывает экспериментальные данные и может служить надежным инструментом для оптимизации и управления процессом мойки деталей машин АПК. Высокие статистические показатели адекватности и хорошая физическая интерпретируемость параметров модели подтверждают ее практическую ценность для внедрения в производственных условиях.

4.3 Исследование возможности регенерации и многократного использования моющего раствора

Внедрение ресурсосберегающей технологии мойки невозможно без решения задачи многократного использования моющих растворов, что позволяет существенно снизить расход химических реагентов и объем образующихся сточных вод. Однако в процессе эксплуатации рабочий раствор подвергается комплексному воздействию: накоплению продуктов удаления загрязнений, изменению химического состава и снижению функциональной активности. В связи с этим, исследование возможности регенерации и определения ресурса моющего раствора является критически важным этапом разработки замкнутой технологической схемы. Настоящий раздел посвящен

изучению деградационных процессов в моющем растворе и разработке методов поддержания его эксплуатационных характеристик.

Для оценки изменения свойств моющего раствора в процессе многократного использования была разработана циклическая методика испытаний. Исследования проводились с использованием оптимизированной моющей композиции в начальной концентрации 3% при температуре 50°C. После каждого цикла комбинированной мойки (продолжительность 15 минут, нагрузка 1 кг деталей на 1,5 л раствора) проводились следующие виды контроля:

- 1) определение моющей способности на стандартных образцах;
- 2) измерение водородного показателя pH;
- 3) анализ содержания эмульгированных нефтепродуктов;
- 4) определение концентрации взвешенных веществ;
- 5) измерение поверхностного натяжения.

Результаты изучения изменения моющей способности раствора по циклам мойки приведены в сводной таблице 4.9, таблице В.8 (приложение В) и на рисунке 4.6.

Таблица 4.9 – Влияние количества циклов мойки на моющую способность (без регенерации раствора)

Количество циклов мойки	0	5	10	15	20	25
Степень очистки, %	98,2	92,1	85,3	76,8	63,2	51,4

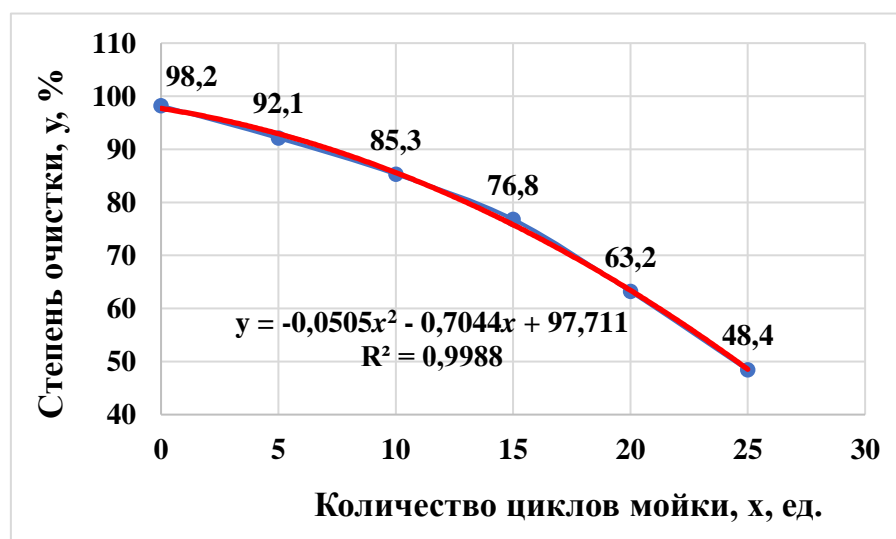


Рисунок 4.6 – Влияние количества циклов мойки на моющую способность раствора (без регенерации раствора)

Анализ кинетики снижения моющей способности демонстрирует ее нелинейное снижение: после 5 циклов – 92,1%, после 10 циклов – 85,3%, после 15 циклов – 76,8% и т.д. Основное снижение эффективности происходит после 10-12 циклов мойки и после 25 циклов она составляет только 48,4%.

Водородный показатель раствора исследуемого моющего средства, определенный по методике, описанной в подразделе 3.4, за 25 циклов мойки изменился незначительно: с 11,6 до 11,2, что подтверждает его стабильную щелочную среду ($\text{pH} > 7$).

Содержание эмульгированных нефтепродуктов определяли методом измерения содержания углерода (ТОС/НРОС (Total Organic Carbon/Non-Purgeable Organic Carbon)). На русский язык переводится как «Общий органический углерод/Непродуваемый (неудаляемый продувкой) органический углерод». Этот метод предусматривает измерение общего содержания органического углерода в пробе раствора [24, 65], так как в моющем растворе содержание углерода в основном зависит от наличия нефтепродуктов. Однако, на содержание углерода влияют ПАВ и другие добавки в растворе, поэтому метод не является селективным. Но при известном исходном составе моющего средства увеличение содержания углерода можно с определенной долей погрешности связать с накоплением нефтепродуктов.

Для нашего случая применение этого метода понимается как измерение именно неудаляемого продувкой, то есть всего нелетучего органического углерода, к которому относятся эмульгированные нефтепродукты и основные компоненты моющего средства.

Описание метода ТОС/НРОС применительно к моющим растворам [96]:

1) Взяли пробу мутного, эмульгированного моющего раствора объемом 600 мл в специальный химический стакан.

2) Раствор подкислили, добавив в нее 60 мл 10%-го раствора ортофосфорной кислоты, что обеспечивает перевод неорганических карбонатов в углекислый газ и их удаление. Для определения необходимого объема 10%-й раствор ортофосфорной кислоты для подкисления 600 мл

раствора провели пробное титрование 50 мл раствора 10%-й ортофосфорной кислотой до pH ~2,5. Умножили полученный объем раствора кислоты (5 мл) на 12 и получили точное количество для 600 мл (60 мл).

3) Продували раствор инертным газом (очищенный азот N₂), для чего пробу поместили в специальный сосуд. Поток инертного газа со скоростью 50-100 мл/мин барботировали через раствор в течение 5-6 мин. При этом летучие органические соединения (спирты, легкие углеводороды, растворители и т.д.) увлекались потоком газа и удалялись из жидкости.

4) После продувки пробу раствора с неудаляемыми продувкой соединениями разместили в реактор для окисления, где весь оставшийся органический углерод превращается в CO₂ для детектирования. Определили количество образовавшегося CO₂, которое прямо пропорционально количеству органического углерода в исходной пробе.

Получены следующие результаты (таблица 4.10, рисунок 4.7).

Таблица 4.10 – Изменение содержания эмульгированных нефтепродуктов в растворе по циклам мойки

Циклы	0	5	10	15	20	25
Содержание эмульгированных нефтепродуктов, г/л	0	1,1	2,3	3,2	3,3	3,4

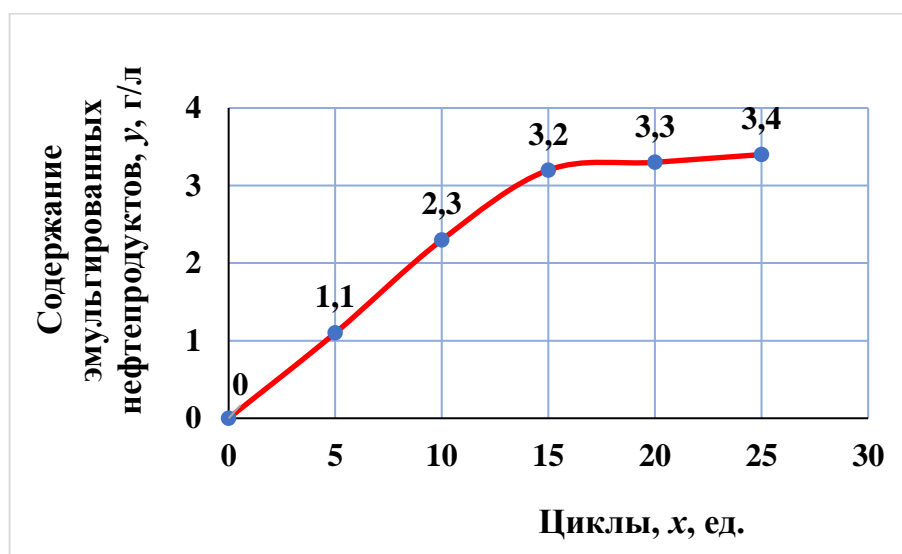


Рисунок 4.7 – Изменение содержания эмульгированных нефтепродуктов в растворе по циклам мойки

Из рисунка 4.7 видно, что содержание эмульгированных нефтепродуктов до 15 циклов интенсивно возрастает, достигая 3,2 г/л, после 15 циклов дальнейший рост незначителен, что свидетельствует о достижении равновесия в системе.

Концентрацию взвешенных веществ определяли гравиметрическим методом в соответствии с [15].

Для этого использовали мембранный фильтр диаметром 47 мм, с размером пор 0,45 мкм, который предварительно высушивали в сушильном шкафу при температуре 105°C до постоянной массы. Затем его охлаждали в эксикаторе и взвешивали на аналитических весах с точностью 0,0001 г ($m_1 = 0,1345$ г).

Пробу объемом $V = 600$ мл предварительно тщательно перемешивали для равномерного распределения взвеси затем пропускали через подготовленный фильтр. После фильтрации на фильтре оставались не только твердые частицы, но и соли, ПАВ, эмульгированные нефтепродукты, которые могут исказить результат, поэтому фильтр с осадком промывали в дистиллированной воде. Затем фильтр с осадком помещали в сушильный шкаф и сушили при температуре 105°C до постоянной массы в течение 1-2 часов, после чего охлаждали в эксикаторе и снова взвешивали (m_2).

Концентрацию взвешенных веществ определяли по формуле [70]:

$$K = \frac{m_2 - m_1}{V} \times 1000000,$$

m_1 – масса чистого фильтра, г;

m_2 – масса фильтра с осадком, г;

V – объем профильтрованной пробы, мл;

1000000 – коэффициент перевода г/мл в мг/л.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.11 и на рисунке 4.8.

Таблица 4.11 – Изменение концентрации взвешенных веществ в растворе по циклам мойки

Циклы	0	5	10	15	20	25
Концентрация взвешенных веществ, г/л	0	2,24	4,50	6,76	8,98	11,20

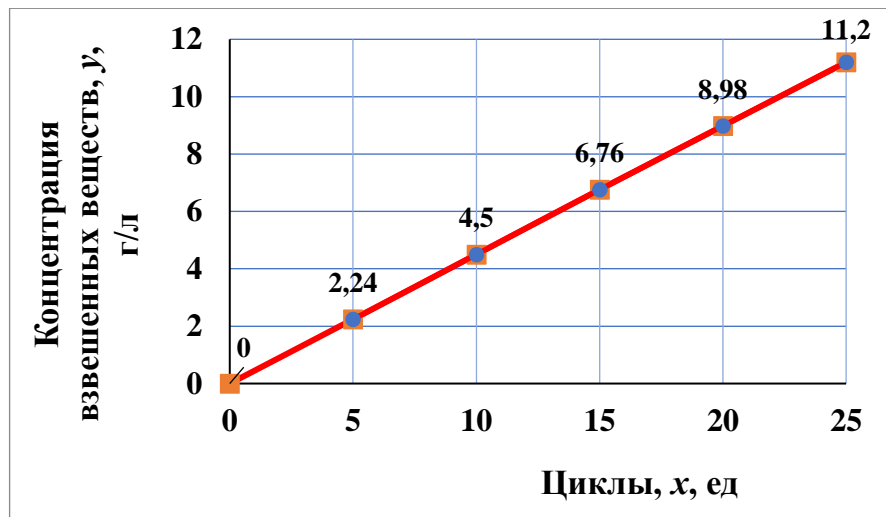


Рисунок 4.8 – Изменение концентрации взвешенных веществ в растворе по циклам мойки

Из рисунка 4.8 видно, что концентрация взвешенных веществ увеличивается по линейному закону со скоростью 0,45 г/л за цикл, достигая 11,2 г/л к 25-му циклу.

Поверхностное натяжение по циклам испытаний определяли по методике, рассмотренной в подглаве 3.4. Полученные результаты приведены в таблице 4.12 и рисунке 4.9.

Таблица 4.12 – Изменение поверхностного натяжения раствора по циклам мойки

Циклы	0	5	10	15	20	25
Поверхностное натяжение, мН/м	29,80	31,55	33,29	35,03	36,78	38,52

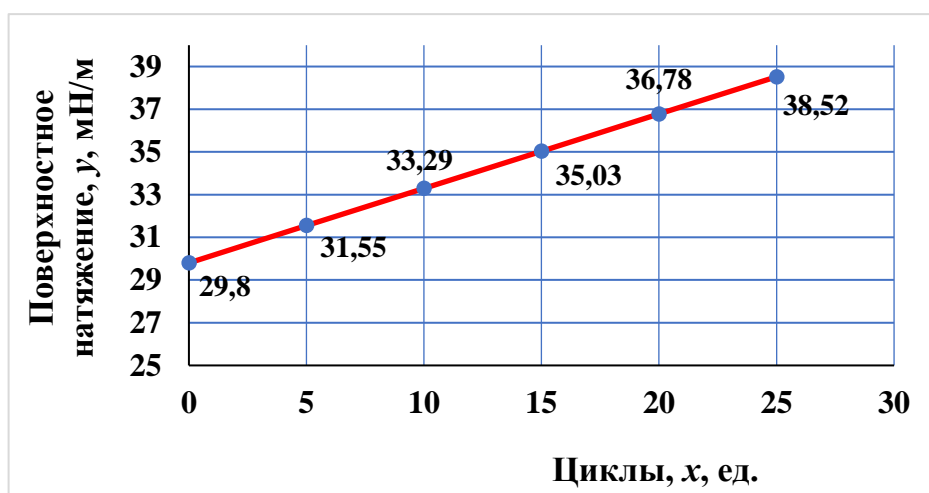


Рисунок 4.9 – Изменение поверхностного натяжения раствора по циклам мойки

Поверхностное натяжение моющего раствора возрастает с 29,8 до 38,52 мН/м за 25 циклов по линейному закону, что указывает на расходование ПАВ и снижение поверхностной активности раствора.

Результаты циклических испытаний выявили четкую зависимость ухудшения основных параметров моющего раствора от числа циклов использования. Для поддержания функциональных свойств раствора после каждого пятого цикла проводилась регенерация раствора с использованием фильтрации. Всего было проведено 25 циклов испытаний.

Применялись гравитационное разделение фаз методом отстаивания и двухступенчатая система фильтрации надсадочного раствора: предварительная грубая очистка (сетчатый фильтр 100 мкм) и тонкая очистка (полипропиленовые картриджные фильтры 10 и 1 мкм).

Эффективность удаления взвешенных веществ составила 92-95%, содержание эмульгированных нефтепродуктов снижалось на 55-60%, моющая способность восстанавливалась на 85-90%.

Внедрение регенерации раствора способствует не только повышению степени очистки деталей, но и переходу к ресурсосберегающей технологии.

1. Раствор можно использовать на 20-25 циклов мойки, не теряя моющей способности, так как в результате фильтрации удаляется основной загрязняющий компонент – частицы масла, что сокращает расходы на моющие средства.

2. На фильтрах концентрируются загрязнения, утилизация которых дешевле, чем утилизация всего объема отработанного моющего раствора.

3. Регенерация обеспечивает стабильно высокое качество мойки деталей.

4. Система регенерации раствора позволяет предприятию соответствовать жестким экологическим нормативам на сброс отходов в канализацию.

5. Регенерация переводит расходный материал (моющий раствор) в категорию возобновляемого ресурса.

Для определения предельного срока службы моющего раствора проводились циклические испытания с регулярной регенерацией каждые 5 циклов (сводная таблица 4.13, таблица В.9 (приложение В), рисунок 4.10).

Таблица 4.13 – Влияние количества циклов мойки на восстановление моющей способности раствора после регенерации

Количество циклов мойки	0	5	10	15	20	25	30
Степень очистки, %	98,2	92,1	88,2	84,7	83,5	78,4	70,8

Анализ результатов экспериментов показали, что:

1. Эффективность регенерации постепенно снижается с увеличением общего числа циклов по линейному закону: после 5-й регенерации (25 циклов) восстановление моющей способности составляет 78,4%, после 6-й регенерации (30 циклов) – 70,8%, что является критическим пределом. Критическим пределом считается снижение моющей способности ниже 75% от первоначального уровня.

2. Снижение моющей способности ниже 75% от первоначального уровня после 30 циклов подтверждает, что в составе раствора произошли необратимые изменения по причине накопления вредных компонентов (продуктов разложения, неорганических солей), ограничивающие возможность дальнейшей регенерации.

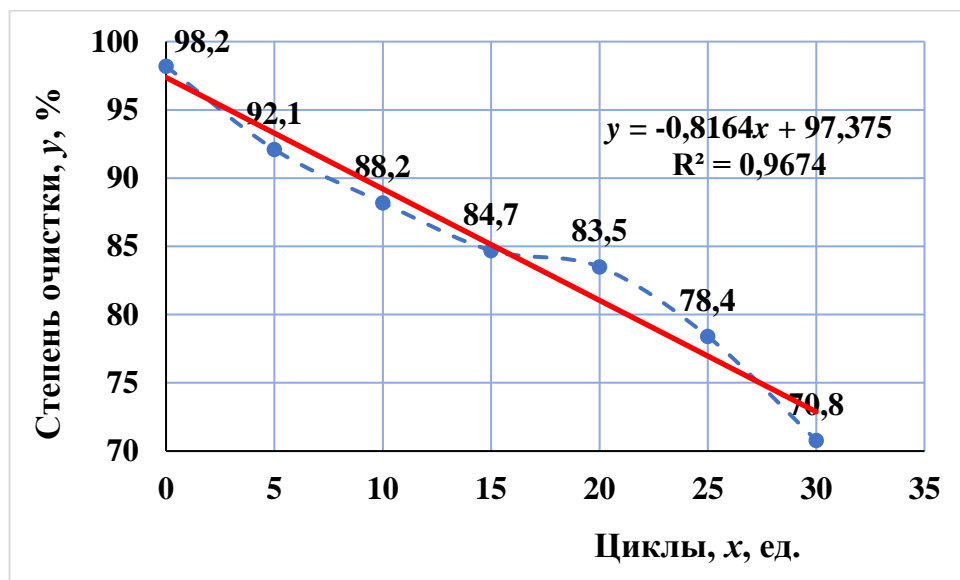


Рисунок 4.10 – Изменение эффективности регенерации раствора по циклам мойки

На основе полученных результатов разработаны практические рекомендации:

1. Оптимальная периодичность регенерации – через каждые 5 циклов

использования.

2. Максимальный срок службы раствора – 25 циклов.
3. Контрольные параметры для принятия решения о регенерации:
 - моющая способность $< 75\%$;
 - содержание нефтепродуктов $> 1,5$ г/л;
 - концентрация взвешенных веществ > 5 г/л.
4. Рекомендуемая технологическая схема регенерации – гравитационное разделение фаз методом отстаивания и двухступенчатая система фильтрации надосадочного раствора: предварительная грубая очистка (сетчатый фильтр 100 мкм) и тонкая очистка (полипропиленовые картриджные фильтры 10 и 1 мкм).

Таким образом, проведенные исследования доказали принципиальную возможность и практическую целесообразность многократного использования моющего раствора после соответствующей регенерации. Разработанная система регенерации позволяет в 3-4 раза увеличить ресурс моющего раствора при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик, что является важным шагом в создании ресурсосберегающей технологии мойки. Полученные результаты создают научно-техническую основу для разработки замкнутых систем оборотного водоснабжения моечных установок.

4.4 Создание принципиальной технологической схемы моечного процесса

Анализ результатов, полученных в предыдущих подразделах главы 4, позволяет перейти к созданию технологического процесса, интегрирующего оптимальные параметры мойки, методы регенерации рабочего раствора и принципы ресурсосбережения, что является завершающим этапом создания научно-технических основ ресурсосберегающей технологии. Настоящий раздел посвящен обоснованию и описанию трехстадийной схемы моечного процесса с замкнутой системой рециркуляции моющих растворов.

Анализ кинетических закономерностей процесса мойки (подраздел 4.1) и исследований по регенерации рабочих растворов (подраздел 4.3) выявил

необходимость разделения процесса на технологические стадии, каждая из которых решает специфические задачи. Трехстадийная схема основана на принципе избирательного воздействия на различные компоненты загрязнения:

– первая стадия (иммерсионный режим без перемешивания) характеризуется быстрым смачиванием и пенетрацией раствора в глубинные слои загрязнения, что ослабляет его адгезионно-когезионные свойства, направлена на удаление грубодисперсных и слабосвязанных загрязнений. На этой стадии осуществляется статическая иммерсионная обработка деталей без принудительной циркуляции моющего раствора. В подготовленный, предварительно нагретый до температуры 50-60°C моющий раствор концентрацией, соответствующей технологическому регламенту, полностью погружается перфорированная корзина с размещенными в нее деталями (неподвижно прикрепленными образцами) (глава 2.5, рисунки В.1, В.2, В.3 в приложении В), что обеспечивает свободный доступ раствора ко всем поверхностям деталей и предварительное разрыхление загрязнений. Естественная тепловая конвекция за счет градиента температур обеспечивает медленное обновление раствора у поверхности деталей. Происходит равномерный прогрев деталей, диффузионный перенос моющих компонентов в загрязнения, их смачивание и разрушение.

Продолжительность обработки регулируется таймер-выключателем и определяется степенью загрязнения и требуемым качеством очистки.

– вторая стадия (иммерсионный режим с перемешиванием) эффективно разрушает связи загрязнения на границе с подложкой обеспечивает механическое удаление прочносвязанных отложений и равномерное распределение тепловых и концентрационных полей. Данный технологический режим включается после завершения первой стадии и характеризуется проведением иммерсионной обработки деталей в условиях интенсивной циркуляции моющего раствора. Процесс осуществляется в том же моющем растворе с температурным диапазоном 50-60°C и регламентированной концентрацией химических компонентов. Отличительной

особенностью второй стадии от первой является перемешивание моющего раствора. Приводная система (рисунок В.3 в приложении В) включает реверсивный электродвигатель 12, смонтированный на регулируемой раме 15. Передача крутящего момента реализована через клиноременную передачу 9 на дисковый активатор центробежного типа 21, расположенный в рабочей емкости 23. В результате создаются турбулентные течения, формируются направленные потоки моющего раствора с регулируемой интенсивностью, обеспечивающих максимальное очищение поверхностей деталей.

Временные параметры процесса программируются с использованием таймер-выключателя в соответствии с требованиями технологического регламента.

– третья стадия (струйная обработка) обеспечивает удаление диспергированных частиц минеральной компоненты за счет локального гидродинамического воздействия на остаточные загрязнения. Этот технологический режим характеризуется применением того же моющего раствора, нагретого до температуры 50-60°C. Циркуляция рабочей жидкости осуществляется посредством насосного агрегата 18 с возможностью плавной регулировки давления в диапазоне 0,2-5,0 МПа и максимальным расходом 4 л/мин, приводимого в действие электродвигателем 16. Под давлением раствор транспортируется через фильтрующий модуль 19, распределительную систему 24 и форсунки 25, формирующие направленные струи, воздействующие на детали, размещённые в технологической корзине.

Для обеспечения равномерной обработки всех поверхностей деталей корзина совершает возвратно-поступательные движения с частотой 0,5 с⁻¹, реализуемые кривошипно-шатунным механизмом (КШМ), состоящим из шатуна 2, кривошипа 3, редуктора ФШ-10/260Е 4. Источником механической энергии для привода в действие колебательной системы служит электродвигатель КФ 160-4/56R 6. Вращательное движение вала электродвигателя преобразуется в возвратно-поступательное перемещение технологической корзины 1 с размещенными в ней очищаемыми деталями (прикрепленными к ней образцами). Частота колебаний корзины регулируется

путем изменения передаточного отношения в редукторном блоке, что позволяет адаптировать динамические характеристики процесса к технологическим требованиям очистки конкретных типов деталей.

Длительность процесса мойки регулируется программируемым таймер-выключателем.

Таким образом, комбинированная мойка, включающая три рассмотренных стадии, обеспечивает эффективную очистку деталей за счёт комплексного воздействия механических, термических и химических факторов. Каждый технологический режим вносит определенный вклад в общий процесс разрушения и удаления сложных загрязнений.

– при необходимости модернизированная универсальная моющая установка может работать в режиме регенерации моющего раствора и финишной промывки деталей (образцов) (для удаления остатков моющего средства). Данный технологический режим характеризуется двухстадийным процессом, включающим регенерацию моющего раствора и заключительную обработку поверхностей.

Стадия 1. Отработанный моющий состав через дренажный узел 17 транспортируется в специализированный регенерационный резервуар. В аккумулярующей емкости осуществляется гравитационное разделение фаз методом отстаивания, обеспечивающее: оседание взвешенных механических частиц, слияние диспергированных углеводородных компонентов, концентрирование труднорастворимых примесей и двухступенчатая система фильтрации надосадочного раствора: предварительная грубая очистка (сетчатый фильтр 100 мкм) и тонкая очистка (полипропиленовые картриджные фильтры 10 и 1 мкм).

Стадия 2. Для удаления адсорбированных остатков моющих компонентов с поверхностных слоев деталей (образцов) применяется техническая вода с температурой 40-50°C и задействуется гидравлическая система, включающая насосный агрегат 18, создающий рабочее давление (0,2-5,0 МПа), систему фильтрации 19 для обеспечения чистоты промывочной

среды и форсунки 25, формирующие направленные струйные потоки, которые оказывают кинематическое воздействие на детали (образцы) в корзине.

Продолжительность стадии финишной промывки программируется с помощью таймерного реле.

После регенерации раствор с коррекцией концентрации компонентов состава возвращается в резервуар моющей установки.

Такой подход позволяет оптимизировать расход моющих средств и энерго-ресурсов, применяя для каждой стадии специализированные режимы обработки.

В рамках предложенной технологической схемы этап финишной промывки деталей после основной очистки исключен. Это обусловлено функциональными свойствами ТБФК, введенного в состав моющего раствора. Данный компонент обеспечивает формирование на поверхности деталей в процессе основной мойки адсорбционно-химического слоя (конверсионного покрытия), обладающего выраженными пассивирующими и ингибирующими свойствами. Образованная пленка препятствует возникновению процессов коррозии в периоде между окончанием мойки и началом последующих технологических операций, выполняя, таким образом, защитную функцию.

Таким образом, сформированная принципиальная технологическая схема трехстадийной мойки с системой рециркуляции представляет собой научно-обоснованное решение, обеспечивающее значительное снижение ресурсоемкости процесса при гарантированном качестве очистки. Интеграция оптимальных параметров обработки и методов регенерации позволяет создать технологию, соответствующую принципам наилучших доступных технологий и концепции устойчивого развития.

4.5 Выводы по главе 4

Проведенные в четвертой главе комплексные исследования технологических аспектов процесса мойки позволили сформулировать следующие основополагающие выводы:

1. Установлены количественные закономерности влияния ключевых

технологических параметров на кинетику процесса мойки. Экспериментально доказано, что процесс удаления конгломератных загрязнений описывается нелинейной зависимостью с выраженным участком насыщения. Определены оптимальные диапазоны технологических параметров: концентрация моющего средства 3%, температура 50-60°C, продолжительность обработки 15 минут. Установлено, что снижение температуры до 40°C обеспечивает сохранение моющей способности на уровне не менее 87%.

2. Экспериментально обоснована возможность многократного использования моющего раствора после регенерации. Установлено, что комбинированный метод регенерации, включающий гравитационное разделение фаз методом отстаивания и двухступенчатую систему фильтрации (грубая и тонкая очистка) надосадочного раствора после отстаивания, позволяет восстановить моющую способность раствора до 85-90% от первоначального уровня. Определен ресурс раствора – 25 циклов использования при регулярной регенерации после каждого 5-го цикла.

3. Сформирована и научно обоснована принципиальная технологическая схема трехстадийного моечного процесса с замкнутой системой рециркуляции. Схема включает три стадии мойки (иммерсионная без перемешивания, иммерсионная с перемешиванием, струйная обработка) и регенерацию растворов, что обеспечивает возможность снижения удельного расхода воды, моющего средства и энергозатрат по сравнению с традиционными схемами.

4. Обоснованы режимные параметры ресурсосберегающей моечной установки. На основе системного подхода определены оптимальные температурные, гидродинамические и временные параметры процесса.

Таким образом, в результате проведенных исследований сформирована научно-обоснованная ресурсосберегающая технология мойки деталей, включающая оптимальные параметры процесса, методы регенерации рабочего раствора и принципиальную технологическую схему.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СФОРМИРОВАННОЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ МОЙКИ

5.1 Результаты производственных испытаний ресурсосберегающей технологии и моющего состава

Апробация сформированных ресурсосберегающей технологии и моющего состава в условиях реального производства является завершающим этапом оценки их эффективности и практической применимости. Производственные испытания позволяют оценить не только технологические показатели в условиях переменной нагрузки и разнородности загрязнений, но и организационно-экономические аспекты внедрения. Настоящий раздел представляет результаты промышленной апробации, проведенной на базе предприятия ООО «СПК Новоселки» Рыбновского района Рязанской области (с. Новоселки) в период с января по март 2024 года в условиях действующего ремонтного подразделения, осуществляющего ремонт собственных тракторов марки МТЗ-82, МТЗ-1221, К-701, автомобилей КамАЗ-45144, ЗиЛ-130, ВАЗ-2131 и комбайна «Асрос». Кроме собственной техники предприятие оказывает услуги по ремонту машин соседним предприятиям.

Была смонтирована опытная установка, реализующая испытываемую трехстадийную схему мойки с системой рециркуляции (рисунок В.1 в приложении В) и традиционную погружную мойку с активацией раствора с помощью дискового активатора (центрифуги), которая применялась в хозяйстве на момент производственных испытаний. В качестве моющего раствора на предприятии использовался 3%-й раствор синтетического моющего раствора Лабомид-203 температурой 80-85°C, продолжительность мойки составляла 25 минут.

Объем экспериментальной партии составил 215 деталей 15 наименований, отобранных по принципу репрезентативности относительно номенклатуры ремонтного фонда предприятия, куда были включены детали с габаритами,

соответствующими размерам моющей емкости установки с общей массой 1,0 тонна.

Выбор деталей для проведения испытаний осуществлен на основе анализа, проведенного в подразделе 1.1, и руководствуясь следующими критериями:

1. Репрезентативность: детали должны принадлежать основным агрегатам машин, наиболее подверженным загрязнению.

2. Распространенность: детали должны быть характерны для широкого парка сельхозмашин (тракторы МТЗ, «Кировец», комбайны «Acros», Дон-1500).

3. Разнообразие материалов и геометрии: номенклатура должна включать детали из черных и цветных металлов, с простой и сложной геометрией поверхности, наличие глухих полостей, масляных каналов, резьбовых отверстий, сложного профиля (зубья шестерен).

4. Тип загрязнений: Масла, консистентные смазки, нагар, продукты износа, абразивные отложения (почва, растительные остатки), охлаждающие жидкости.

В соответствии с этими критериями, сформирована номенклатура деталей для исследования (таблица В.10 (приложение В)).

Все детали перед использованием в экспериментах подвергались процедуре предварительной подготовки, включающей:

1. Гравиметрирование на лабораторных весах ВЛЭ-6202С1 с точностью $\pm 0,01$ г для определения исходной массы.

2. Контроль исходного состояния поверхности деталей с помощью оптической микроскопии для фиксации микрорельефа и наличия дефектов (рисунок 5.1).

Организация экспериментов:

- продолжительность: 45 рабочих дней;
- объем обработанных деталей: 1,0 тонна (по 0,5 тонны на базовую и испытываемую технологии мойки);
- сравнительный анализ проводился с базовой технологией мойки.

Условия проведения экспериментов по определению моющей способности по существующей и испытываемой технологиям:

– контрольная группа: мойка по существующей технологии (щелочной состав «Лабомид-203», $t = 80-85^{\circ}\text{C}$ и $t = 40-50^{\circ}\text{C}$, продолжительность мойки 20 мин., 25 процессов мойки, масса деталей в корзине – 20 ± 5 кг, одноразовое использование раствора);

– опытная группа: мойка по испытываемой технологии (оптимизированный состав, $t = 40-50^{\circ}\text{C}$, масса деталей в корзине – 20 ± 5 кг, продолжительность мойки 15 мин., рециркуляция с регенерацией раствора после каждого цикла из 5 процессов мойки, всего 25 процессов мойки).

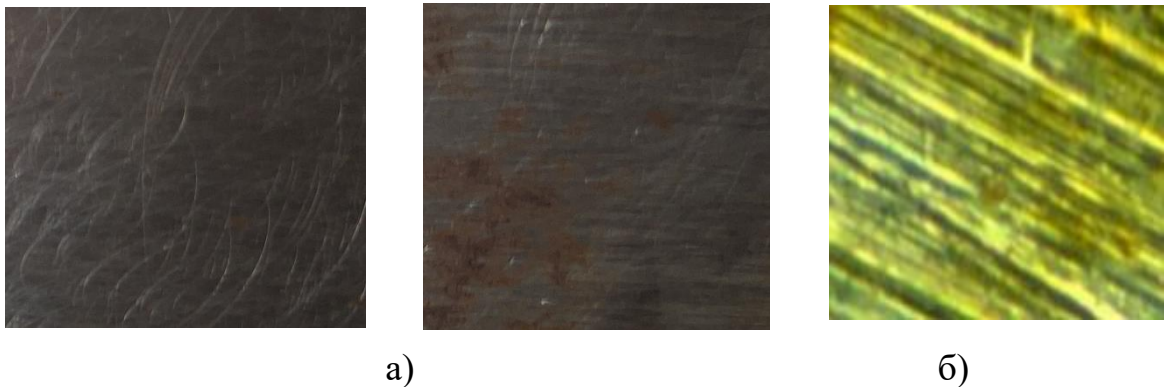


Рисунок 5.1 – Поверхности деталей (а – из стали Ст3; б – алюминиевого сплава АЛ4) при увеличении $\times 100$ с помощью оптического микроскопа

Степень очистки (C , %) поверхности детали традиционно рассчитывается по формуле [93]:

$$C = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} \times 100\%,$$

M_1 – масса чистой детали (без загрязнений), г;

M_2 – масса грязной детали (с загрязнениями), г;

M_3 – масса детали после мойки и сушки, г;

Однако в условиях проводимого эксперимента значение M_1 недоступно, поскольку масса идеально чистой детали неизвестна (отсутствует в технической документации).

В связи с этим для определения массы чистой детали воспользовались методом многократного циклического промывания 3-х экземпляров каждого

наименования деталей из испытательной партии. Для этого одни и те же детали промывали многократно (5-7 циклов) по испытываемой технологии до стабилизации массы (когда снижение массы деталей после очередной мойки составило менее 0,01 г).

Массы 3-х экземпляров деталей после стабилизации усредняли и принимали как условно чистую массу данного наименования детали $M_1^{усл}$ (таблица В.10 (приложение В)).

Тогда степень очистки после мойки определяли по формуле:

$$C = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1^{усл}} \times 100\%,$$

$M_1^{усл}$ – масса условно чистой детали (после многократной промывки), г;

M_2 – масса грязной детали (с загрязнениями), г;

M_3 – масса детали после мойки и сушки, г;

Метод многократного циклического промывания позволяет проводить сравнительную оценку эффективности базовой и испытываемой технологий мойки в условиях отсутствия значения массы чистой детали. Степень очистки, определенная по этой методике, служит вспомогательным критерием для сопоставления базовой и испытываемой технологий мойки. Этот метод оценки был дополнен визуальным методом контроля чистоты поверхности.

Результаты сравнительных испытаний отражены в сводной таблице 5.1 и таблице В.11 (приложение В), согласно которым испытываемая технология мойки демонстрирует значительное преимущество в эффективности очистки по сравнению с существующим аналогом. Применение новой технологии обеспечивает степень очистки на уровне 85,8%, что на 3,9% превышает результат базовой технологии (81,9%), при одновременном увеличении стабильности показателя. Визуальный контроль и инструментальные измерения подтвердили отсутствие остаточных загрязнений в труднодоступных зонах деталей.

Таблица 5.1 – Результаты сравнения моющей способности по существующей и испытываемой 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 испытываемой технологии						
40-50	92,3	88,5	85,4	84,2	78,8	85,8

Ключевым аспектом является температурный режим процесса: испытываемая технология достигает указанной эффективности при существенно более низкой температуре рабочего раствора (40-50°С), в то время как существующая технология требует нагрева раствора до 80-85°С, что делает его менее надежным и более затратным.

Проведенный сравнительный анализ дополнительно подтверждает зависимость эффективности базовой технологии от поддержания высокотемпературного режима. При снижении температуры раствора до диапазона 40-50°С ее результативность резко падает до 48,6%. Это свидетельствует о том, что высокая степень очистки в существующем процессе достигается за счет термического фактора, а не оптимизированного моющего воздействия. Основное преимущество новой методики заключается в ее способности достигать более высокой очистки при значительно меньших энергозатратах, связанных с нагревом рабочего раствора (снижение требуемой температуры на 30-40°С).

5.2 Расчет экономии воды, моющих средств, энергии и снижения затрат

Количественная оценка ресурсосберегающего эффекта является важнейшим этапом обоснования практической ценности испытываемой

технологии мойки. Проведенный расчет позволяет не только определить абсолютные показатели экономии, но и установить взаимосвязи между технологическими параметрами процесса и экономическими результатами. Настоящий раздел представляет детальный расчет экономии материальных и энергетических ресурсов, а также оценку снижения эксплуатационных затрат при внедрении испытываемой технологии мойки.

При определении экономии ресурсов учитывались региональные тарифы на энергоносители, воду и утилизацию отходов.

Расчеты выполнены для условий предприятия средней мощности с годовым объемом мойки 50 тонн деталей. Сравнение проводилось с базовой технологией, характеристики которой определены в ходе исследований.

1. Расчет экономии водных ресурсов

Водопотребление является одним из наиболее значимых показателей ресурсоемкости процесса мойки. Экономия воды достигается за счет внедрения системы рециркуляции и многократного использования моющих растворов. Система регенерации позволила организовать 25 циклов использования моющего раствора без замены.

Исходные данные для расчета:

- объем обрабатываемых деталей: 1,0 т
- удельный расход воды по базовой технологии при количестве процессов мойки 25, массе деталей в корзине 20 кг, объеме емкости установки 30 л составит:

$$V_{\text{баз}}^{\text{уд}} = \frac{30\text{л} \cdot 25}{20\text{кг} \cdot 25} = 1,5 \text{ л/кг};$$

- удельный расход воды по испытываемой технологии при количестве процессов мойки 25, массе деталей в корзине 20 кг, объеме емкости установки 30 л составит:

$$V_{\text{исп}}^{\text{уд}} = \frac{30\text{л}}{20\text{кг} \cdot 25} = 0,06 \text{ л/кг};$$

- коэффициент потерь в системе рециркуляции – 0,15;
- тариф на воду для юридических лиц в Рязанской области: – 45 руб/м³.

Расчет годовой экономии воды:

1) Годовое потребление воды по базовой технологии:

$$V_{\text{баз}} = 1,5 \text{ л/кг} \times 50000 \text{ кг} = 75000 \text{ л} = 75,0 \text{ м}^3.$$

2) Годовое потребление воды по испытываемой технологии:

$$V_{\text{исп}} = 0,06 \text{ л/кг} \times 50000 \text{ кг} \times 1,15 = 3450 \text{ л} \approx 3,45 \text{ м}^3.$$

3) Абсолютная годовая экономия воды:

$$\Delta V = 75,0 - 3,45 = 71,55 \text{ м}^3.$$

4) Годовая экономия в денежном выражении:

$$\mathcal{E}_{\text{воды}} = 45 \text{ руб/м}^3 \times 71,55 \text{ м}^3 = 3219,75 \text{ руб.}$$

Таким образом, внедрение испытываемой технологии позволяет сократить водопотребление на 95,2% с годовой экономией 3219,75 рублей.

2. Расчет экономии моющих средств

Экономия моющих средств достигается за счет оптимизации концентрации рабочего раствора и организации замкнутого цикла оборотного водоснабжения, то есть его многократного использования с регенерацией.

Исходные данные для расчета:

– удельный расход моющего средства по базовой технологии при количестве процессов мойки 25, массе деталей в корзине 20 кг, объеме емкости установки 30 л, концентрации 3% Лабомида-203 в растворе составит:

$$M_{\text{баз}}^{\text{уд}} = \frac{30\text{г} \cdot 30 \cdot 25}{20\text{кг} \cdot 25} = 45,0 \text{ г/кг};$$

– удельный расход по испытываемой технологии при количестве процессов мойки 25, массе деталей в корзине 20 кг, объеме емкости установки 30 л, концентрации 3% испытываемого состава в растворе составит:

$$M_{\text{исп}}^{\text{уд}} = \frac{30\text{г} \cdot 30}{20\text{кг} \cdot 25} = 0,18 \text{ г/кг};$$

– стоимость моющего средства Лабомид-203: 180 руб/кг;

– стоимость испытываемого состава: 220 руб/кг;

– количество циклов использования раствора: 25.

Расчет годовой экономии:

1) Годовой расход по базовой технологии:

$$M_{\text{баз}} = 0,045 \text{ кг/кг} \times 50000 \text{ кг} = 2250,0 \text{ кг.}$$

2) Годовой расход по испытываемой технологии:

$$M_{\text{исп}} = 0,00018 \text{ кг/кг} \times 50000 \text{ кг} = 9,0 \text{ кг.}$$

3) Годовой расход в денежном выражении на моющее средство Лабомид-203 по базовой технологии:

$$M_{\text{баз}}^{\text{руб}} = 180 \text{ руб/кг} \times 2250,0 \text{ кг} = 405000 \text{ руб.}$$

4) Годовой расход в денежном выражении на моющее средство по испытываемой технологии:

$$M_{\text{исп}}^{\text{руб}} = 220 \text{ руб/кг} \times 9,0 \text{ кг} = 1980 \text{ руб.}$$

5) Годовая экономия в денежном выражении:

$$\Delta_{\text{моющее}} = M_{\text{баз}}^{\text{руб}} - M_{\text{исп}}^{\text{руб}} = 405000 \text{ руб} - 1980 \text{ руб} = 403020 \text{ руб.}$$

Годовой финансовый эффект от экономии на моющих средствах составляет 403020 рублей.

3. Расчет экономии тепловой энергии

Снижение рабочей температуры процесса с 85°C до 50°C обеспечивает значительную экономию тепловой энергии.

Для расчета расхода электроэнергии на нагрев моющего раствора от 20°C до 85°C по базовой технологии и от 20°C до 50°C по испытываемой технологии воспользовались онлайн-расчетами по ссылке [111].

Расход электроэнергии на нагрев раствора по базовой технологии составил 2,3873 кВт·ч (11,17 руб., время нагрева 0,551 ч.), по испытываемой технологии – 1,1018 кВт·ч (5,16 руб., время нагрева 1,194 ч.).

Тогда исходные данные для расчета:

– удельный расход тепловой энергии по базовой технологии:

$$2,3873 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 25/500 \text{ кг} = 0,12 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг};$$

– удельный расход по испытываемой технологии:

$$1,1018 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \times 25 / 500 \text{ кг} = 0,055 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг};$$

– КПД системы нагрева: 0,95;

– стоимость тепловой энергии: 4,68 руб/кВт·ч.

Расчет годовой экономии:

- 1) Годовое потребление по базовой технологии:

$$Q_{\text{баз}} = 0,12 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} \times 50000 \text{ кг} / 0,95 = 6316 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

- 2) Годовое потребление по испытываемой технологии:

$$Q_{\text{исп}} = 0,055 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} \times 50000 \text{ кг} / 0,95 = 2895 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

- 3) Абсолютная годовая экономия:

$$\Delta Q = 6316 - 2895 = 3421 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

- 4) Годовая экономия в денежном выражении:

$$\mathcal{E}_{\text{тепло}}^{\text{руб}} = 4,68 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \times 3421 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 16010,28 \text{ руб}.$$

Экономия тепловой энергии составляет 54,2% с годовым финансовым эффектом 16010,28 рублей.

4. Расчет экономии электроэнергии

Экономия электроэнергии достигается за счет оптимизации работы насосного оборудования и сокращения времени мойки.

Расход электроэнергии на привод центрифуги по базовой технологии на 25 процессов мойки составил: $0,16 \text{ кВт} \times 0,33 \text{ ч} \times 25 = 1,32 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Расход электроэнергии по испытываемой технологии на 25 процессов мойки составил: на привод центрифуги $0,16 \text{ кВт} \times 0,08 \text{ ч} \times 25 = 0,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; на привод жидкостного насоса: $0,08 \text{ кВт} \times 0,08 \text{ ч} \times 25 = 0,16 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; на привод КШМ: $0,06 \text{ кВт} \times 0,08 \text{ ч} \times 25 = 0,12 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Итого: $0,61 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Исходные данные для расчета:

- удельный расход электроэнергии по базовой технологии:

$$1,32 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / 500 \text{ кг} = 0,0026 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг};$$

- удельный расход по испытываемой технологии:

$$0,61 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / 500 \text{ кг} = 0,001 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг};$$

- стоимость электроэнергии: 4,68 руб/кВт·ч.

Расчет годовой экономии электроэнергии:

- 1) Годовое потребление электроэнергии по базовой технологии:

$$\mathcal{E}_{\text{баз}} = 0,0026 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} \times 50000 \text{ кг} = 132 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

- 2) Годовое потребление по испытываемой технологии:

$$\mathcal{E}_{\text{исп}} = 0,001 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг} \times 50000 \text{ кг} = 50 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

3) Абсолютная годовая экономия электроэнергии:

$$\Delta \text{Эл} = 132 - 50 = 82 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

4) Годовая экономия в денежном выражении:

$$\text{Эл}^{\text{руб}} = 4,68 \text{ руб/кВт}\cdot\text{ч} \times 82 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 383,76 \text{ руб}.$$

Экономия электроэнергии составляет 62,0% с годовым финансовым эффектом 383,76 рубля.

5. Расчет снижения затрат на утилизацию отходов

Внедрение системы регенерации позволяет значительно сократить объем образующихся жидких отходов.

Объем образующихся жидких отходов по базовой технологии на 25 процессов мойки составил: $30 \text{ л} \times 25 = 750 \text{ л}$.

Объем образующихся жидких отходов по испытываемой технологии на 25 процессов мойки составил: $30 \text{ л} \times 1 = 30 \text{ л}$.

Исходные данные для расчета:

– удельное образование жидких отходов по базовой технологии: $750 \text{ л} / 500 = 1,5 \text{ л/кг}$ ($1,5 \text{ м}^3/\text{т}$);

– удельное образование жидких отходов по испытываемой технологии: $30 \text{ л} / 500 = 0,06 \text{ л/кг}$ ($0,06 \text{ м}^3/\text{т}$);

– стоимость утилизации: 3500 руб/м^3 .

Расчет годовой экономии по утилизации жидких отходов:

1) Годовое образование жидких отходов по базовой технологии:

$$O_{\text{баз}} = 1,5 \text{ м}^3/\text{т} \times 50 \text{ т} = 75,0 \text{ м}^3.$$

2) Годовое образование жидких отходов по испытываемой технологии:

$$O_{\text{исп}} = 0,06 \text{ м}^3/\text{т} \times 50 \text{ т} = 3,0 \text{ м}^3.$$

3) Абсолютное снижение объема жидких отходов:

$$\Delta O = 75,0 - 3,0 = 72,0 \text{ м}^3.$$

4) Годовая экономия на утилизации жидких отходов в денежном выражении:

$$\text{Э}_{\text{утил}} = 3500 \text{ руб/м}^3 \times 72,0 \text{ м}^3 = 252000 \text{ руб}.$$

Снижение затрат на утилизацию жидких отходов составляет 96,0 % с годовым эффектом 252000 рублей.

Рассчитаем сокращение объема токсичных отходов (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Сравнительная характеристика образования токсичных отходов

Вид отходов	Базовая технология	Испытываемая технология	Сокращение, %
Отработанные моющие растворы, т/год	75,0	3,0	96,0
Шламы после очистки, т/год	4,91	0,18	95,9
Фильтровальные материалы, т/год	1,26	0,05	96,1
Итого токсичных отходов, т/год	81,17	3,23	96,0

Для перевода единицы измерения твердых отходов т/год в м³/год определили их плотность. Отработанные фильтровальные материалы (картриджи) имеют плотность 417,5 кг/м³. Тогда:

- по базовой технологии $1260 \text{ кг} / 417,5 \text{ кг} \times 1 \text{ м}^3 = 3,02 \text{ м}^3$;
- по испытываемой технологии $50 \text{ кг} / 417,5 \text{ кг} \times 1 \text{ м}^3 = 0,12 \text{ м}^3$.

Плотность шлама после очистки определили по следующей методике:

а) Взвесили мерный цилиндр объемом ($V = 0,0005 \text{ м}^3$) $M_{\text{ц}} = 0,3255 \text{ кг}$.

б) Наполнили цилиндр шламом без уплотнения и срезали излишки шлама по краю цилиндра.

с) Взвесили цилиндр с материалом $M_{\text{ц}}^{\text{м}} = 0,9148 \text{ кг}$.

д) Плотность шлама (ρ) рассчитали по формуле:

$$\rho = (M_{\text{ц}}^{\text{м}} - M_{\text{ц}}) / V = (0,9148 \text{ кг} - 0,3255 \text{ кг}) / 0,0005 \text{ м}^3 = 1178,6 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда:

- по базовой технологии $4910 \text{ кг} / 1178,6 \text{ кг} \times 1 \text{ м}^3 = 4,17 \text{ м}^3$;
- по испытываемой технологии $180 \text{ кг} / 1178,6 \text{ кг} \times 1 \text{ м}^3 = 0,15 \text{ м}^3$.

Итого твердых отходов:

- по базовой технологии $4,17 \text{ м}^3 + 3,02 \text{ м}^3 = 7,19 \text{ м}^3$;
- по испытываемой технологии $0,15 \text{ м}^3 + 0,12 \text{ м}^3 = 0,27 \text{ м}^3$.

Исходные данные для расчета затрат на утилизацию твердых отходов:

- удельное образование твердых отходов по базовой технологии: $7,19 \text{ м}^3 / 50 \text{ т} = 0,14 \text{ м}^3/\text{т}$;
- удельное образование жидких отходов по испытываемой технологии: $0,27 \text{ м}^3 / 50 \text{ т} = 0,0054 \text{ м}^3/\text{т}$;
- стоимость утилизации: $4200 \text{ руб}/\text{м}^3$.

Расчет годовой экономии по утилизации твердых отходов:

1) Годовое образование твердых отходов по базовой технологии:

$$O_{\text{баз}} = 0,14 \text{ м}^3/\text{т} \times 50 \text{ т} = 7,0 \text{ м}^3.$$

2) Годовое образование твердых отходов по испытываемой технологии:

$$O_{\text{исп}} = 0,0054 \text{ м}^3/\text{т} \times 50 \text{ т} = 0,27 \text{ м}^3.$$

3) Абсолютное снижение объема твердых отходов:

$$\Delta O = 7,0 - 0,27 = 6,73 \text{ м}^3.$$

4) Годовая экономия на утилизации твердых отходов в денежном выражении:

$$Э_{\text{утил}} = 4200 \text{ руб}/\text{м}^3 \times 6,73 \text{ м}^3 = 28266 \text{ руб.}$$

Снижение затрат на утилизацию твердых отходов составляет 96,1 % с годовым эффектом 28266 рублей.

Снижение объема отходов при испытываемой технологии мойки можно объяснить следующими факторами:

- увеличение срока службы моющего раствора;
- эффективность системы регенерации;
- снижение выхода шлама за счет улучшения качества очистки;
- многократное использование фильтровальных материалов;

На основе выполненных расчетов определена общая годовая экономия эксплуатационных затрат (таблица 5.3).

Анализ данных таблицы 5.3 позволяет резюмировать, что испытываемая технология мойки обеспечивает повышение ресурсосберегающих показателей, таких как экономия: воды – на 95,4%, моющих средств – на 99,6%,

тепловой энергии – на 54,2%, электроэнергии – на 62,1% и снижение расходов на утилизацию жидких отходов на 96,0%, твердых – на 96,1%.

Испытываемая технология является инновационной и перспективной для внедрения, так как позволяет одновременно повысить как качественный показатель (степень очистки), так и эксплуатационно-экономические параметры процесса (снижение затрат и экономия ресурсов).

Таблица 5.3 – 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, кг/год	2250,0	9,0	–	403020,0
Тепловая энергия, кВт·ч/год	6316,0	2895,0	3421,0	16010,28
Электрическая энергия, кВт·ч/год	132,0	50,0	82,0	383,76
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

Результаты сравнительного анализа технологических показателей эффективности представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Сравнительные технологические показатели эффективности испытываемой технологии

Показатель	Базовая технология	Испытываемая технология	Прирост, %
Средняя степень очистки по 25 процессам мойки, %	81,9	85,8	+3,9
Время цикла мойки, (включая время подогрева раствора до требуемого значения), мин	20,0 (71,64)	15,0 (33,06)	–5,0 (25%) (–38,58) (46,15%)
Энергозатраты на нагрев, кВт·ч/кг	0,12	0,055	-0,065
Трудоемкость операции, (включая время подогрева раствора до требуемого значения), чел·ч/т	12,5 (76,2)	16,5 (40,05)	–4,0 (–36,15)

Трудоемкость операции по базовой технологии:

- без учета времени подогрева раствора до 85°C:

$$0,33 \text{ чел}\cdot\text{ч} / 20 \text{ кг} \times 1000 = 16,5 \text{ чел}\cdot\text{ч}/\text{т};$$

- с учетом времени подогрева раствора до 85°C:

$$0,33 \text{ чел}\cdot\text{ч} + 1,194 \text{ чел}\cdot\text{ч} / 20 \text{ кг} \times 1000 = 76,2 \text{ чел}\cdot\text{ч}/\text{т}.$$

Трудоемкость операции по испытываемой технологии:

- без учета времени подогрева раствора до 50°C:

$$0,25 \text{ чел}\cdot\text{ч} / 20 \text{ кг} \times 1000 = 12,5 \text{ чел}\cdot\text{ч}/\text{т};$$

- с учетом времени подогрева раствора до 50°C:

$$0,25 \text{ чел}\cdot\text{ч} + 0,551 \text{ чел}\cdot\text{ч} / 20 \text{ кг} \times 1000 = 40,05 \text{ чел}\cdot\text{ч}/\text{т}.$$

Из анализа результатов, отраженных в таблице 5.4, следует:

1. Испытываемая технология обеспечила повышение качества мойки, что отражается в статистически значимом повышении степени очистки на 3,9%. Визуальный контроль и инструментальные измерения подтвердили отсутствие остаточных загрязнений в труднодоступных зонах деталей.

2. Применение испытываемой технологии способствует повышению производительности труда. Сокращение времени цикла мойки на 25,0%, а с учетом времени подогрева раствора на 46,15%, позволило увеличить пропускную способность моечного отделения с 100 кг до 160 кг деталей в смену.

3. Снижение рабочей температуры с 80-85°C до 45-50°C обусловило уменьшение энергозатрат на нагрев раствора на 55,4%. Система рециркуляции дополнительно снизила тепловые потери, что доказывает высокую энергоэффективность предложенной технологии.

Проведен мониторинг экологических параметров испытываемой технологии:

- образование жидких отходов снижено с 1,5 м³/т до 0,06 м³/т;
- сброс в канализацию жидких отходов отсутствует, так как применяется замкнутый цикл использования раствора после регенерации.

В ходе испытаний отмечены значительные улучшения эргономических и санитарно-гигиенических показателей:

- температура в рабочей зоне снизилась с 32-35°C до 24-26°C;
- относительная влажность в помещении мойки снизилась с 75-85% до 55-60%.

Таким образом, сравнительный анализ демонстрирует превосходство испытываемой ресурсосберегающей технологии по всем основным показателям эффективности: технологическим, экономическим, экологическим и санитарно-гигиеническим. Наибольшее улучшение достигнуто в областях экологической безопасности и ресурсосбережения, что соответствует современным требованиям к технологиям мойки.

Полученные результаты обосновывают целесообразность широкого внедрения сформированной технологии мойки на ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса.

5.3 Выводы по главе 5

Проведенные в пятой главе экспериментальные исследования и экономический анализ позволяют сформулировать следующие основополагающие выводы, подтверждающие эффективность и практическую значимость сформированной ресурсосберегающей технологии мойки:

1. Экспериментальные исследования, проведенные на базе ремонтного подразделения сельскохозяйственного предприятия ООО «СПК Новоселки» Рыбновского района Рязанской области (с. Новоселки), показали высокую технологическую эффективность сформированной технологии. Установлено статистически значимое повышение степени очистки деталей на 3,9% (с 81,9% до 85,8%) при одновременном сокращении времени продолжительности мойки на 25,0%. Технология продемонстрировала адаптивность к различным типам загрязнений.

2. Сравнительный анализ с базовой технологией выявил преимущества сформированного способа по всем ключевым показателям: технологическим, экономическим, экологическим и санитарно-гигиеническим. Наибольшее

улучшение достигнуто в областях экологической безопасности и ресурсосбережения, что соответствует современным требованиям к технологиям мойки деталей.

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

4. Годовой экономический эффект в сравнении с базовой технологией мойки составил 703600 рублей в год.

5. Оценка экологического эффекта показала кардинальное снижение нагрузки на окружающую среду. Внедрение сформированной технологии позволило полностью исключить сброс сточных вод в канализацию (снижение на 100%) и сократить объем образования токсичных отходов на 96,1%. Годовой предотвращенный экологический ущерб составляет 280266 рублей, что подтверждает соответствие технологии критериям наилучших технологий мойки деталей.

Таким образом, результаты, полученные в главе 5, доказывают, что предложенная ресурсосберегающая технология мойки обладает высокой технологической, экономической, экологической и санитарно-гигиенической эффективностью, соответствует современным требованиям ремонтного производства и может быть рекомендована к широкому внедрению на ремонтных предприятиях АПК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное комплексное исследование, направленное на совершенствование технологии мойки деталей машин АПК с применением многофункциональных добавок, позволило сформулировать следующие основополагающие выводы, отражающие научную новизну, теоретическую и практическую значимости работы:

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°C), 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.

Таким образом, поставленная в диссертационной работе цель достигнута, все задачи решены в полном объеме. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного научно-технического решения, обеспечивающего существенное снижение ресурсоемкости процесса мойки при гарантированном качестве очистки и соблюдении экологических требований. Полученные результаты имеют высокую теоретическую и практическую значимость, вносят значительный вклад в развитие ресурсосберегающих технологий в области технического сервиса машин и создают предпосылки для дальнейшего совершенствования процессов очистки в АПК.

Сформированная технология соответствует критериям наилучших доступных технологий мойки деталей и агрегатов, рекомендована к внедрению в ремонтных подразделениях предприятий АПК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ способов очистки и мойки поверхностей деталей в процессе ремонта агрегатов автотракторной техники / И.В. Фадеев, Е.И. Степанова, В.П. Воронов, С.Д. Полищук // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2022. – Т. 14, № 2. – С. 183-192.
2. Болдин, А.П. Основы научных исследований: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / А.П. Болдин, В.А. Максимов. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 336 с.
3. Бышов, Н.В. Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ / Н.В. Бышов, И.А. Успенский, В.В. Алексеев, И.В. Фадеев, // Инженерные технологии и системы. – 2019. – № 1. – С. 249-255.
4. Ванн, М. Повышение эффективности и качества очистки поверхности деталей от эксплуатационных загрязнений за счет применения вибрационной обработки в технологии авторемонтных производств: автореф. дисс. ...канд. техн. наук 05.02.08 / Мао Ванн. – Ростов на Дону, 2003. – 22 с.
5. Влияние активации раствора колебанием корзины с деталями в моющей установке на степень очистки деталей / А.В. Шемякин, И.В. Фадеев, И.А. Юхин [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15, № 1. – С. 175-181.
6. Влияние продолжительности струйной мойки на степень очистки деталей / И.В. Фадеев, И.А. Успенский, В.П. Воронов [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 8(302). – С. 28-30.
7. Влияние температуры растворов синтетических моющих средств на их моющую способность / Быков В.В., Загородских Б.П., Ременцов А.Н., Юдин В.М. // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса. Наука и высш. проф. образование. Волгоград. – 2019. – №1(53). – С. 249-255.
8. Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 31.07.2025).
9. Воронов, В.П. Совершенствование мойки деталей автотракторной

техники: дисс. ...канд. техн. наук: 05.20.03 / Воронов Владимир Петрович. – Рязань, 2022. – 125 с.

10. Галынский В.А. Льдоструйная очистка поверхности деталей машин и оборудования при техническом обслуживании и ремонте: дисс. ...канд. техн. наук: 05.20.03 / Галынский Владимир Алексеевич. – Москва, 2007. – 130 с.

11. Глицероборатное моюще-пассивирующее средство для ремонтного производства автотракторной техники / И.В. Фадеев, И.А. Успенский, Л.Ш. Пестряева, Ш.В. Садетдинов // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса. Наука и высш. проф. образование. Волгоград. – 2021. – № 2(62). – С. 431-441.

12. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Москва: Стандартинформ, 1985. Дата введения: 1985-10-31.

13. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. Москва: Стандартинформ, 2007. Дата введения: 1977-01-01.

14. ГОСТ 9.402-2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. Москва: Стандартинформ, 2005. Дата введения: 2006-01-01.

15. ГОСТ 3351-74 «Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности» с Изменением № 1, утвержденным в феврале 1985 г.

16. Джон Б. Дурки: Управление технологиями и процессами промышленной очистки, 2006, Эльзевир, Оксфорд, Великобритания, 0-08-044888-7 ISBN.

17. Дидманидзе, О.Н. Анализ эффективности внедрения технологии ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники / О.Н. Дидманидзе, Д.Ю. Петрик // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 7(337). – С. 37-38.

18. Дипинаконборатные добавки в растворы для мойки деталей автотракторной техники / И.В. Фадеев, И.А. Успенский, Д.А. Пестряев [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 5(287). – С. 37-40.

19. Дорохов, А.В. Влияние времени и плотности тока при электроосаждении на краевой угол самачивания / Н.А. Курьято, Л.Г. Князева, А.В. Дорохов, В.А. Брыксина // Электрохимия и коррозия металлов и сплавов: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 110-летию со дня рождения А. Я. Шаталова, 95-летию со дня рождения И. К. Маршакова. – Воронеж, 2023. – С. 94-96.

20. Дорохов, А.В. Защита стальной поверхности комбинированными ингибиторами коррозии / Л.Г. Князева, Н.А. Курьято, А.В. Дорохов // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37.№ 2 (264). С. 57-61.

21. Дорохов, А.В. К оценке ингибиторной защиты сельскохозяйственной техники и оборудования / Л.Г. Князева, А.В. Дорохов, Н.А. Курьято // Наука в центральной России. – 2023. – № 1 (61). – С. 133-146.

22. Дорохов, А.В. Экологически безопасные продукты для защиты от коррозии / Л.Г. Князева, Н.А. Курьято, А.В. Дорохов, В.А. Брыксина // Наука в центральной России. – 2023. – № 3 (63). – С. 131-142.

23. Дэвид С. Питерсон: Практическое руководство по промышленной очистке металла. 1997, Издательство Хансера Гарднера, Цинциннати, Огайо, США. ISBN 1-56990-216-X

24. Епишина, Т.М. Сравнительные исследования токсичности новых синтетических моющих средств на основе анионных и неионогенных поверхностно активных веществ / Т.М. Епишина // Токсикологический вестник. – 2024. – Т. 32, № 5. – С. 301-306.

25. Жильцов, К.А. Технология и устройство для очистки деталей двигателей внутреннего сгорания лёдно-кавитационными струями: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.03 // Жильцов Кирилл Алексеевич. – Иваново, 2011. – 135 с.

26. Жолобов, Л.А. Способ безразборного удаления нагара с деталей двигателя внутреннего сгорания / Л.А. Жолобов, А.Н. Бандура // Наука в центральной России. – 2025. – № 5(77). – С. 87-97.

27. 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.

28. Защита углеродистой стали консервационным составом с добавкой парафина / Н. А. Курьято, Л. Г. Князева, В. А. Курьято, А. В. Дорохов // Наука в центральной России. – 2025. – № 1(73). – С. 98-105.

29. Защитная эффективность консервационных составов на основе растительных масел / А. А. Урядников, Л. Е. Цыганкова, М. Н. Урядникова [и др.] // Наука в центральной России. – 2025. – № 6(78). – С. 107-114.

30. Исследование цинкнаполненных композиций для защиты от атмосферной коррозии углеродистой стали / Л.Г. Князева, В.А. Курьято, А.В. Дорохов, Н.А. Курьято // Наука в центральной России. – 2025. – № 4(76). – С. 130-138.

31. Казарин А.С. Анализ составов для мойки деталей автотракторной техники / И.В. Фадеев, Е.И. Степанова, А.С. Казарин, В.П. Воронов // В сборнике: Инновации в сельскохозяйственном машиностроении, энергосберегающие технологии и повышение эффективности использования ресурсов. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, академика РАТ Николая Николаевича Колчина. Рязань, РГАТУ, 2022. – С. 392-400.

32. Казарин А.С. Анализ состояния вопроса разработки боратсодержащих ингибиторов коррозии для растворов синтетических моющих средств / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, А.С. Казарин // Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники: сб. материалов Международной науч.-практич. конф., посвященной 20-летию кафедры технической эксплуатации транспорта, Рязань, РГАТУ, 2020. – С. 291-298.

33. Казарин А.С. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники / И.В. Фадеев, И.А. Успенский, Л.Ш. Пестряева, Ш.В.

Садетдинов, А.С. Казарин // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса. Наука и высш. проф. образование. Волгоград. – 2020. – №3 (59). – С. 365-376.

34. Казарин А.С. Новый ингибитор коррозии для повышения циклической прочности стали в коррозионной среде / И.В. Фадеев, А.С. Казарин // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сборник статей XIV Международной научно-практической конференции. МНИЦ ПГАУ. – Пенза: РИО ПГАУ, 2020. – С. 73-77.

35. Казарин А.С. Синергетический эффект противокоррозионных составов / С.А. Ильин, А.С. Казарин, И.В. Фадеев // Автомобильный транспорт: эксплуатация, сервис, подготовка кадров. Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Чебоксары, 2024. – С. 35-40.

36. Казарин А.С. Улучшение противокоррозионных свойств растворов синтетических технологических средств / И.А. Юхин, И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, А.С. Казарин // Механика и технология. – 2020. – Т.1 – №1. – С. 132-137.

37. Казарин А.С. Эффективные ингибиторы коррозии для технологических сред на предприятиях АПК / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, А.С. Казарин // Актуальные вопросы совершенствования технической эксплуатации мобильной техники: сб. материалов Международной науч.-практич. конф., посвященной 20-летию кафедры технической эксплуатации транспорта, Рязань, РГАТУ, 2020. – С. 156-162.

38. Карагодин, В.И. Технологические процессы технического обслуживания и ремонта транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования (строительные и дорожные машины): учебник / В.И. Карагодин. – М.: КНОРУС, 2024. – 330 с.

39. Карелина, М.Ю. Увеличение эксплуатационного ресурса сельхозтехники путем поверхностно-энергетической модификации поверхностей трибосопряжений фторуглеродными поверхностно-активными веществами / Н.Ю. Бугакова, С.М. Гайдар, М.Ю. Карелина, В.М. Приходько // Технология

металлов. – 2019. – № 4. – С. 24-31.

40. Катаев, Ю.В. Анализ факторов, влияющих на нагарообразования в ДВС / Ю.В. Катаев, В.М. Корнеев // Сборник статей по итогам II международной научно-практической конференции «Горячкинские чтения», посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 256-261.

41. Князева, Л. Г. Цинкнаполненные покрытия для защиты сельскохозяйственной техники от атмосферной коррозии / Л. Г. Князева, А. В. Дорохов, Н. А. Курьято // Наука в центральной России. – 2024. – № 5(71). – С. 139-148.

42. Козлов, Ю.С. Очистка изделий в машиностроении. / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, Н.Ф. Тельнов. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.

43. Корнеев, В.М. Интенсификация погружной очистки деталей машин гидродинамической кавитацией / В.М. Корнеев, Ю.В. Катаев, Н.В. Корнеев // Технический сервис машин. – 2025. – Т. 63, № 2. – С. 16-21.

44. Корнеев, В.М. Интенсификация процесса очистки деталей погружением в моющий раствор / В.М. Корнеев, Д.И. Петровский, Н.В. Корнеев // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 5. – С. 47-52.

45. Корнеев, В.М. Интенсификация процесса погружной очистки деталей ультразвуковыми колебаниями / В.М. Корнеев, Д.И. Петровский, Н.В. Корнеев // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 5. – С. 54-60.

46. Корнеев, В.М. Очистка деталей в погружных машинах с активацией моющего раствора ультразвуком / В.М. Корнеев, Д.И. Петровский, Н.В. Корнеев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2025. – № 9. – С. 32-38.

47. Корнеев, В.М. Процесс погружной очистки металлических поверхностей деталей машин / В.М. Корнеев, Ю.В. Катаев, Н.В. Корнеев // Технический сервис машин. – 2024. – Т. 62, № 3. – С. 25-32.

48. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024622207 Российская Федерация. Ресурсосберегающая технология погружной очистки деталей автотракторной техники : № 2024621991 : заявл.

07.05.2024 : опубл. 22.05.2024 / А. Ю. Фомин, И. Н. Кравченко, В. М. Корнеев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – EDN OYMTPX.

49. Creation of Protective Coatings on the Working Surfaces of Machine Parts by High-Velocity Flame Spraying / Yu. A. Kuznetsov, A. V. Dobychin, D. D. Yakovlev, I. N. Kravchenko [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2025. – Vol. 2025, No. 6. – P. 1485-1489.

50. Исследование открытой пористости покрытий, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления / Ю. А. Кузнецов, А. В. Добычин, Д. Д. Яковлев, И. Н. Кравченко [и др.] // Технология металлов. – 2025. – № 10. – С. 34-40.

51. Applying Polyvinyl Alcohol Coatings for the Protection against Corrosion Damage / N. V. Danyakin, I. N. Kravchenko, A. A. Baranov, A. S. Smirnov // Steel in Translation. – 2025. – Vol. 55, No. 5. – P. 503-510.

52. Кравченко, И.Н. Оценка работоспособности и долговечности восстановленных деталей и соединений / И.Н. Кравченко, С.А. Величко, А.В. Мартынов и др. // Технология металлов. – 2023. – № 7. – С. 42-48.

53. Кудряшов, М.Б. Автоматизация технологического процесса ультразвуковой очистки деталей на промышленном предприятии: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Кудряшов Михаил Борисович. – М., 2005. – 185 с.

54. Кулик, С.Н. Совершенствование противокоррозионной защиты машин и оборудования животноводческих комплексов: дисс. ...канд. техн. наук: 4.3.1 / Кулик Сергей Николаевич. – Рязань, 2023. – 148 с.

55. Лялякин, В.П. Повышение послеремонтной безотказности агрегатов тракторов / В.П. Лялякин, Д.А. Гительман, Р.Ю. Соловьев, А.К. Ольховацкий // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2023. – №6. – С. 36-42.

56. Малюгин, С.Г. Совершенствование технологии наружной очистки сельскохозяйственной техники с обоснованием параметров и режимов работы

установки водовоздушной мойки: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / Малюгин Сергей Герасимович. – Рязань, 1998. – 24 с.

57. Мансураева, Л.М. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение / Л.М. Мансураева, И.И. Юсупова, С.А. Булаев // Вестник магистратуры. – 2022. – № 2-1(125). – С. 30-35.

58. Масляные композиции с парафином и присадкой М-531 для защиты меди от атмосферной коррозии / Л. Г. Князева, Н. А. Курьято, А. В. Дорохов, В. А. Брыксина // Практика противокоррозионной защиты. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 46-57.

59. Митрохина, Е.В. Совершенствование технологического процесса мойки деталей при ремонте техники в сельском хозяйстве: дисс. ...канд. техн. наук: 05.20.03 / Митрохина Екатерина Владимировна. – Рязань, 2021. – 148 с.

60. Определение оптимальной продолжительности процесса мойки деталей в растворе синтетического моющего средства / И.А. Успенский, С.Н. Кулик, Е.В. Митрохина, И.В. Фадеев // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 8(278). – С. 40-42.

61. Оценка абразивной стойкости композиций на основе полиуретановых компаундов, применяемых при изготовлении диафрагм мембранно-поршневых насосов / Ю.В. Катаев, Ю.А. Гончарова, А.С. Свиридов [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2022. – № 6(300). – С. 38-41.

62. Совершенствование методов контроля и диагностики свойств металлоконструкций в условиях коррозионного воздействия / М. Н. Ерофеев, А. И. Чмыхало, В. В. Спирыгин, И. Н. Кравченко [и др.] // Технология металлов. – 2022. – № 7. – С. 40-53. – DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-7-40-53.

63. 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 [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева».

64. Петрик, Д.Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах / Д. Ю. Петрик, В. М. Корнеев, В. Ю. Петрик // *Агроинженерия*. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 81-84.

65. Повышение противокоррозионных свойств растворов для мойки деталей при ремонте автомобилей / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, Л.Ш. Пестряева [и др.] // *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*. – 2021. – № 3(66). – С. 62-66.

66. Повышение эффективности мойки деталей при ремонте автомобилей. Быков В.В., Загородских Б.П., Садетдинов Ш.В., Юдин В.М. // *Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса. Наука и высш. проф. образование. Волгоград*. – 2019. – №1(53). – С. 358-363.

67. Присадка к средствам для мойки деталей автотракторной техники / И.А. Успенский, И.В. Фадеев, Л.Ш. Пестряева [и др.] // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. – 2020. – № 4(60). – С. 414-425.

68. Противокоррозионная защита цинкнаполненными покрытиями / Л. Г. Князева, В. А. Курьято, А. В. Дорохов, Н. А. Курьято // *Наука в центральной России*. – 2025. – № 6(78). – С. 99-106.

69. Прохоренков, В.Д. Разработка методов противокоррозионной защиты и технологических процессов хранения сельскохозяйственной техники: дисс. ...доктора техн. наук: 05.17.03 / Прохоренков Вячеслав Дмитриевич. – Тамбов, 2002. – 400 с.

70. Регламент ЕС № 648/2004 Европейского парламента и Совета ЕС о детергентах. Страсбург, 31 марта 2004 г.

71. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621195 Российская Федерация. «Ресурсосберегающая технология струйной гидродинамической очистки наружных поверхностей автотракторной техники» : № 2024620813 : заявл. 11.03.2024 : опубл. 19.03.2024 / И. Н. Кравченко, В. М. Корнеев, А. В. Корнеев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». – EDN ННQHАН.

72. Смирнов, А.Г. Исследование методов очистки загрязненных деталей системы смазки и внутренних поверхностей двигателя / А.Г. Смирнов, В.С. Павлов // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 1(12). – С. 116-122.

73. Смирнов, А.Г. Коррозия машин и оборудования хмелеводства в атмосферных условиях / А.Г. Смирнов, А.А. Гордеев, А.В. Семенов // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3(22). – С. 113-119.

74. Смирнов, А. Г. Использование биоразлагаемых материалов для защиты сельскохозяйственной техники от коррозии / А. Г. Смирнов, И. И. Максимов, М. Н. Калимуллин // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2025. – Т. 20, № 1(77). – С. 75-81.

75. Смирнов, А. Г. Исследование коррозионной активности формиата натрия и бишофита в составе комплексного противогололедного материала по отношению к оцинкованным покрытиям стальных деталей / А. Г. Смирнов, А. А. Гордеев, А. В. Семенов // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1(32). – С. 214-220.

76. Смирнов, А. Г. Влияние противогололедного материала формиат натрия на коррозию оцинкованной стали / А. Г. Смирнов, А. А. Гордеев, В. Н. Батманов // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1(28). – С. 168-172.

77. Смирнов, А. Г. Противокоррозионные свойства сосновой живицы / А. Г. Смирнов, И. И. Максимов, А. А. Гордеев // Сельский механизатор. – 2025. – № 8. – С. 35-37.

78. Способ удаления нагара с деталей камеры сгорания автомобильных двигателей внутреннего сгорания / Н.Н. Бирюков, Д.Н. Мудрецов, В.А. Марков [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 7. – С. 19-27.

79. Степанова, Е.И. Совершенствование мойки деталей при ремонте машин в агропромышленном комплексе: дисс. ...канд. техн. наук: 4.3.1 / Степанова Екатерина Ивановна. – Рязань, 2024. – 155 с.

80. Степанова, Е.И. Совершенствование мойки деталей при ремонте машин в агропромышленном комплексе: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 4.3.1 / Степанова Екатерина Ивановна. – Рязань, 2024. – 18 с.

81. Тараканова, Н.М. Технология и устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием абразивно-кавитационной струи: автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.20.03 / Тараканова Надежда Михайловна. – Рязань, 2011.–22 с.

82. Korneev, N. V. Methods of Intensified Cleaning of Component Parts in Submerged Washing Machines / N. V. Korneev, I. N. Kravchenko, V. M. Korneev // *Steel in Translation*. – 2025. – Vol. 55, No. 9. – P. 925-929.

83. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 030/2012 «О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям» (с изменениями на 3 марта 2017 года).

84. Ткачев, К.В. Технология неорганических соединений бора / К.В. Ткачев, Ю.С. Плышевский. – Л.: Химия, 1983. – 208 с.

85. Фадеев, И.В. Совершенствование технологического процесса мойки деталей при ремонте техники: монография / И.В. Фадеев, Е.А. Митрохина, Е.И. Степанова; под общ. ред. И.В. Фадеева. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2023. – 160 с.

86. Фадеев И.В. Основы научных исследований и патентоведения: учебное-методическое пособие / И.В. Фадеев, А.В. Рязанов. – Чебоксары: ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, 2023. – 325 с.

87. Фадеев, И.В. Совершенствование технологии мойки деталей при ремонте машин: монография / И.В. Фадеев, И.А. Успенский, И.А. Юхин, А.В. Шемякин; под общ. ред. И.А. Успенского. – Чебоксары : Чуваш. гос. пед. ун-т, 2020. – 343 с.

88. Фадеев, И.В. Выбор рационального режима мойки деталей узлов и агрегатов транспортных средств / И.В. Фадеев // Автотранспортное предприятие. – 2016. – №5. – С. 28-31.

89. Фадеев, И.В. Повышение эффективности технологического процесса мойки при ремонте автомобилей в сельском хозяйстве: автореф. дисс. ...доктора техн. наук: 05.20.03 / Фадеев Иван Васильевич. – Рязань, 2019. – 39 с.

90. Фадеев, И.В. Повышение эффективности технологического процесса мойки при ремонте автомобилей в сельском хозяйстве: дисс. ...доктора техн. наук: 05.20.03 / Фадеев Иван Васильевич. – Рязань, 2019. – 395 с.

91. Фадеев, И.В. Применение тетраборатов лития, натрия, калия в качестве экологически чистых добавок к моющим средствам / И.В. Фадеев, В.В. Белов, Ш.В. Садетдинов // Известия Международной академии аграрного образования. – 2015. – №21. – С. 52-55.

92. Фадеев, И.В. Разработка синтетических моющих средств на основе боратов для очистки поверхности металлов: монография [Текст] / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, И.Е. Илларионов. Под общ. ред. И.Е. Илларионова. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2016. – 185 с.

93. Фатюхин, Д.С. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой очистки инжекторов: дисс. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Фатюхин Дмитрий Сергеевич. – М., 2001. – 200 с.

94. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 04.11.2022) «Об охране окружающей среды».

95. Физико-механические характеристики диафрагм мембранно-поршневого насоса из полиуретанового компаунда / Ю. В. Катаев, А. С. Свиридов, В. Э. Славкина [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2024. – № 5(323). – С. 37-39.

96. Хабардин, В. Н. Проблемы утилизации загрязнённых нефтепродуктами отходов производства при техническом обслуживании сельскохозяйственных машин / В. Н. Хабардин, Н. О. Шелкунова // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 3(101). – С. 161-166.

97. Шварц, Е.М. Взаимодействие борной кислоты со спиртом и оксикислотами / Е.М. Шварц. – Рига: Зинатне, 1990. – 414 с.

98. 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».

99. Шемякин, А.В. Совершенствование организации работ, связанных с хранением сельскохозяйственных машин в условиях малых и фермерских хозяйств: автореф. дисс. ...доктора техн. наук : 05.20.03 / Шемякин Александр Владимирович. – Мичуринск, 2014. – 39 с.

100. Шемякина, Е.Ю. Технология очистки сельскохозяйственных машин с обоснованием параметров и режимов работы моечной установки с воздушным экраном: автореф. дисс. ...канд. техн. наук : 05.20.03 / Шемякина Евгения Юрьевна. – Рязань, 2009. – 22 с.

101. Юдаков, Е.Г. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой очистки корпусных деталей автотракторных двигателей: автореферат дисс. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Юдаков Евгений Геннадьевич. – М., 2013. – 19 с.

102. Яруллин, М.Г. Интенсификация очистки изделий в погружных моечных машинах на базе пространственных механизмов: дисс. ...доктора техн. наук: 05.20.03 / Яруллин Мунир Гумерович. – Казань, 2002. – 487 с.

103. Byshov N.V., Uspensky I.A., Fadeev I.V., Sadetdinov Sh.V. Synergetic effect of bactericidal action of borates in solutions of synthetic detergents, Research journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences (ISSN: 0975-8585), 2019, no. 10 (2), pp. 1441-1446.

104. Holmberg K. Surfactants and Polymers in Aqueous Solution / K. Holmberg, B. Jönsson, B. Kronberg, B. Lindman. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2002. – 568 p.

105. Perry D.L. Handbook of Inorganic Compounds. – 2nd ed. – CRC Press, 2011. – 30 p.

106. Protection of steel against atmospheric corrosion by oil compositions with paraffin / L. G. Knyazeva, L. E. Tsygankova, N. A. Kur'yato [et al.] // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2025. – Vol. 14, No. 1. – P. 169-178.

107. Rojagoplan, K.S. Orantification of the elements contributing to the direct cost corrosion and its application to the chloralkoli inolstry / K.S. Rojagoplan. // I. Sci and Int. Res., 1985, no. 8, pp. 430-431.

108. Rosen M.J., Kunjappu J.T. Surfactants and Interfacial Phenomena / M.J. Rosen. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 616 p.

109. Staryi, A. R. Research of the impact on productivity of parameters and operating modes of the vibration machine drive for cleaning and washing contaminations by submergtd stream jet with solid particles / A. R. Staryi, A. I. Hordeev // East European Scientific Journal. – 2021. – No. 4-1(68). – P. 46-52. – DOI 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.68.13. – EDN PLGGPP.

110. Wang, T., Chang, D., Huang, D. et al. Application of surfactants in papermaking industry and future development trend of green surfactants. Appl Microbiol Biotechnol 105, 7619-7634 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11602-6>.


111. Yang, L. The Study of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel and Aluminum under Salt Deposit Using Coupled Multielectrode Array Sensors / L. Yang, R.T. Pabalan, D.S. Dunn // the 204th Meeting of the Electrochemical Society – Abstract 465, Extended Abstract Volume 2003-II (Pennington, NJ: Electrochemical Society, 2003).

112. <https://nagrev24.ru/voda/?t1=50&t2=85&vol=30&eff=95&power=2&pricerice=4.68>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А (справочное)

Документы, подтверждающие техническую новизну моющих средств, применяемых для мойки и очистки узлов, агрегатов и деталей

<p>РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ</p>  <p>ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ</p>	<p>(19) RU (11) 2 777 442 (13) C1</p> <p>(51) МПК <i>C11D 1/72</i> (2006.01) <i>C11D 1/02</i> (2006.01) <i>C11D 3/08</i> (2006.01) <i>C11D 3/08</i> (2006.01) <i>C11D 3/10</i> (2006.01)</p>	
<p>(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ</p>		
<p>(52) СПК <i>C11D 1/72</i> (2022.05); <i>C11D 1/02</i> (2022.05); <i>C11D 3/06</i> (2022.05); <i>C11D 3/08</i> (2022.05); <i>C11D 3/10</i> (2022.05)</p>		
<p>(21)(22) Заявка: 2021130520, 19.10.2021</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 19.10.2021</p> <p>Дата регистрации: 03.08.2022</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 19.10.2021</p> <p>(45) Опубликовано: 03.08.2022 Бюл. № 22</p> <p>Адрес для переписки: 428000, Чувашская Респ., г. Чебоксары, ул. К. Маркса, 38, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева", управление научной и инновационной работы</p>	<p>(72) Автор(ы): Фадеев Иван Васильевич (RU), Садетдинов Шейнцман Вазыхович (RU), Степанова Екатерина Ивановна (RU), Ремизов Андрей Николаевич (RU), Митрохина Екатерина Владимировна (RU), Казарин Александр Сергеевич (RU), Воронов Владимир Петрович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Чувашский государственный педагогический университет им. И.Я. Яковлева" (RU)</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: https://www.stud24.ru/travelport/kateicheskije-areadivy/315900-947407.page1.html, RU 2687160-C1, 17.03.2019, И.В. Фадеев, В.К. Половояк, С.С. Еремеева, М.В. Садетдинов, "Вязкие амидобратных соединений на противокоррозионные свойства стали", Научно-технический вестник Поволжья, номер 3, 2015. SU 644819 A1, 30.01.1979. SU 973607 A1, 15.11.1982. (см. прод.)</p>	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">RU 2 777 442 C 1</p>
<p>(54) СРЕДСТВО ДЛЯ МОЙКИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ</p>		
<p>(57) Реферат: Изобретение относится к моющим средствам, применяемым для мойки металлических поверхностей деталей транспортных средств, восстанавливаемых в процессе ремонта, от загрязнений жировыми пленками, нагарам, продуктами коррозии и масляно-смолистыми загрязнениями, и может быть использовано в качестве нового эффективного моющего средства в ремонтном производстве на предприятиях агропромышленного и автотранспортного комплексов. Описано моющее средство для очистки деталей транспортных средств от</p>		
<p>загрязнений на основе сикантола ДС-10 или ДТ-7; оксидов или эфатов; триафторфосфата или динатрийфосфата, триполифосфата натрия, метасиликата натрия, карбоната натрия, сульфата натрия, в котором для повышения моющей способности, смачиваемости и противокоррозионных свойств дополнительно используется тетраборат аммония. Технический результат - повышение моющих и противокоррозионных свойств моющего состава. 3 табл.</p>		

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022665017

**«ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЙКИ ДЕТАЛЕЙ
АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ) (RU)*

Авторы: *Шемякин Александр Владимирович (RU), Борычев Сергей Николаевич (RU), Успенский Иван Алексеевич (RU), Юхин Иван Александрович (RU), Фадеев Иван Васильевич (RU), Лимаренко Николай Владимирович (RU), Ракул Елена Анатольевна (RU), Голиков Алексей Анатольевич (RU), Безносюк Роман Владимирович (RU), Мотуз Николай Сергеевич (RU), Казарин Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № **2022664362**

Дата поступления **29 июля 2022 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 августа 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


Ю.С. Зубов



Приложение В (справочное)

Результаты выполненных научных исследований

Методика проведения симплекс-решетчатых планов

1. Определяются компоненты, влияние которых необходимо изучить (ПАВ, щелочной бустер (концентрированное средство, предназначенное для формирования необходимой моющей среды при мойке), комплексон (органическое соединение, растворимое в воде, которое образует устойчивые внутрикомплексные соединения (хелаты) с катионами металлов), ингибитор коррозии, снижающий коррозионную активность моющего раствора). Прочие компоненты (растворители) вносятся в постоянной, оптимизированной в предварительных опытах, пропорции.

2. Выбирается квадратичная модель Шеффе, которая для четырех компонентной смеси ($q = 4$) имеет вид:

$$y = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4,$$

где: y – выходной параметр (моющая способность, коррозия и т.д.);

x_1 – доля компонента ПАВ (лаурилсульфат натрия);

x_2 – доля компонента щелочной бустер (метасиликат натрия);

x_3 – доля компонента комплексон (триполифосфат натрия);

x_4 – доля компонента ингибитор коррозии (тетраборфосфат калия);

β_i – коэффициенты линейных эффектов;

β_{ij} – коэффициенты парных взаимодействий.

Примечание: Отсутствие свободного члена (β_0) обусловлено условием $x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 1$, а отсутствие квадратичных членов объясняется их линейным выражением через другие члены модели. Доля компонентов в смеси находится в интервале $0 \leq x_i \leq 1$, а их сумма $\sum x_i = 1$.

3. Для оценки коэффициентов квадратичной модели используется план $\{q, 2\}$ – симплекс-решетка второго порядка. Для 4-х компонентов это 10 опытов: четыре вершины симплекса (чистые компоненты), четыре середины его ребер (бинарные смеси в пропорции 1:1).

4. Для повышения точности и проверки адекватности модели план дублируется (проводится 3 параллельных опыта для каждой точки), а также добавляются проверочные точки в центре симплекса и в других внутренних точках.

Обработка данных проводится методом наименьших квадратов. Полученная модель позволяет построить изолинии отклика на треугольной диаграмме состав-свойство, визуально определить области с максимальной эффективностью и рассчитать оптимальное соотношение компонентов.

Матрица планирования для 4-х компонентов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица планирования для 4-х компонентов (план {4, 2})

№№ опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	Тип точки
1	1	0	0	0	Вершина симплекса
2	0	1	0	0	Вершина симплекса
3	0	0	1	0	Вершина симплекса
4	0	0	0	1	Вершина симплекса
5	1/2	1/2	0	0	Середина ребра
6	1/2	0	1/2	0	Середина ребра
7	1/2	0	0	1/2	Середина ребра
8	0	1/2	1/2	0	Середина ребра
9	0	1/2	0	1/2	Середина ребра
10	0	0	1/2	1/2	Середина ребра

Коэффициенты модели интерпретируются следующим образом:

β_i – ожидаемый отклик для чистого i -го компонента;

β_{ij} – эффект взаимодействия между i -м и j -м компонентами;

При $\beta_{ij} > 0$ – наблюдается синергизм (усиление эффекта);

При $\beta_{ij} < 0$ – наблюдается антагонизм (ослабление эффекта).

Методика проведения ПФЭ плана 2^4

1. Выбираются четыре фактора ($n = 4$): x_1 , x_2 (концентрации моющего средства и многофункциональной добавки), x_3 (температура), x_4 (продолжительность).

2. Для каждого фактора задаются верхний (+1) и нижний (-1) уровни.

3. Составляется матрица планирования, включающая 16 опытов (2^4). Все опыты проводятся в случайном порядке.

4. В результате оценивается модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1 x_2 + b_{13}x_1 x_3 + b_{14}x_1 x_4 + b_{23}x_2 x_3 + b_{24}x_2 x_4 + b_{34}x_3 x_4 + b_{123}x_1 x_2 x_3 + b_{124}x_1 x_2 x_4 + b_{134}x_1 x_3 x_4 + b_{234}x_2 x_3 x_4 + b_{1234}x_1 x_2 x_3 x_4,$$

где b_0 – свободный член,

b_i – коэффициенты линейных эффектов,

b_{ij} – коэффициенты парных взаимодействий.

После проведения серии экспериментов в соответствии с планом выполняется статистический анализ полученных данных.

1. Проверка однородности дисперсии и воспроизводимости

– рассчитывается дисперсия воспроизводимости (S^2) по результатам параллельных опытов:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1};$$

– проверяется однородность дисперсий по критерию Кохрена (G).

$$G_p = \frac{S_{jmax}^2}{\sum_{j=1}^m S_j^2};$$

Если расчетное значение G_p меньше табличного $G_{табл}$, дисперсии считаются однородными.

2. Расчет коэффициентов модели и проверка их значимости

– коэффициенты регрессии (b_i) рассчитываются методом наименьших квадратов.

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_n}{N},$$

где x_{ji} – параметры процесса мойки;

N – число опытов.

– проверка значимости каждого коэффициента проводится по t -критерию Стьюдента. Рассчитывается доверительный интервал для коэффициента:

$$\Delta b_i = t_{табл} \cdot S\{b_i\},$$

где $S\{b_i\}$ – стандартная ошибка коэффициента.

Если $|b_i| > \Delta b_i$, коэффициент считается значимым и остается в модели, в противном случае – исключается.

3. Проверка адекватности модели

– рассчитывается дисперсия адекватности ($S_{ад}^2$) по расхождениям между предсказанными моделью и экспериментальными значениями отклика в проверочных точках:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N-B} \cdot \sum (y_j - \hat{y}_j)^2.$$

– адекватность модели проверяется по F -критерию Фишера. Рассчитывается F -отношение:

$$F = S_{ад}^2 / S_{восп}^2.$$

Если $F_{расч} < F_{табл}$, модель признается адекватной экспериментальным данным.

4. Интерпретация результатов и оптимизация

– анализируются знаки и величины коэффициентов модели. Положительный коэффициент b_i указывает на то, что с ростом фактора x_i положительный отклик увеличивается, отрицательный – уменьшается. Значимые коэффициенты взаимодействия (b_{ij}) свидетельствуют о том, что эффект одного фактора зависит от уровня другого.

– для визуализации модели строятся поверхности и линии отклика.
– для поиска оптимальных условий используется метод многокритериальной оптимизации, например, функция желательности Харрингтона, которая позволяет свернуть несколько откликов (например, моющая способность и коррозионная активность) в один обобщенный критерий.



Рисунок В.1 – Внешний вид модернизированной лабораторной моечной установки

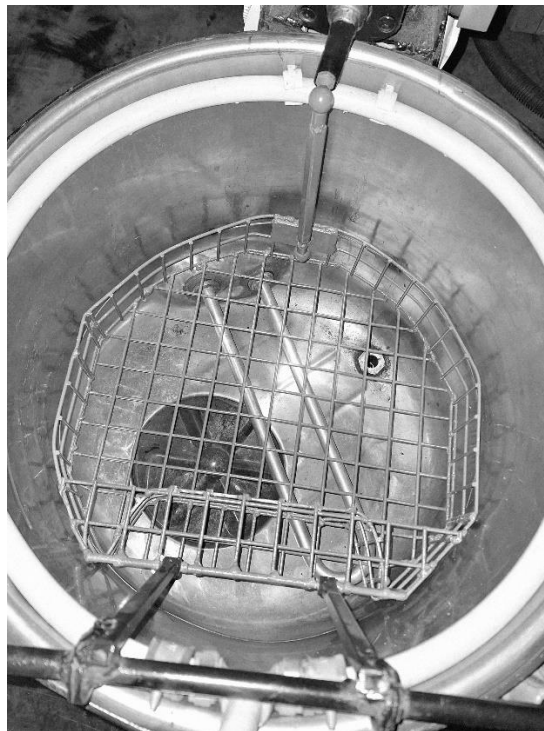


Рисунок В.1 – Вид емкости для раствора, корзины для деталей, привода (КШМ) для корзины, ТЭНа, дискового активатора

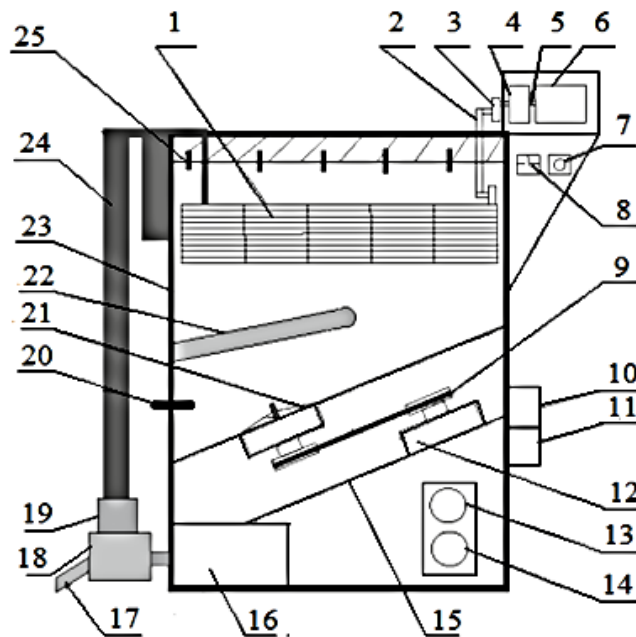


Рисунок В.3 – Схема модернизированной лабораторной моечной установки

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; реверса-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;

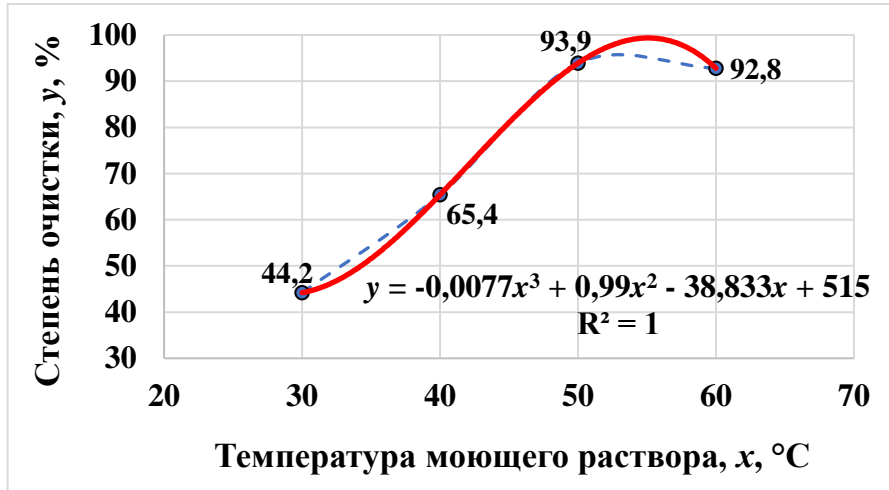
системы подачи жидкости с интервалом давления 0,2-5,0 Мпа – 24; форсунок (10 шт.) – 25.

Теплоэнергетический модуль включает электроиндукционный нагреватель (ТЭН) 22, осуществляющий конверсию электрической энергии в тепловую с последующей ее передачей моющей жидкости в резервуаре 23. Контроль температурного режима рабочей среды обеспечивается посредством термометрического устройства 20, что гарантирует поддержание оптимальных параметров процесса очистки.

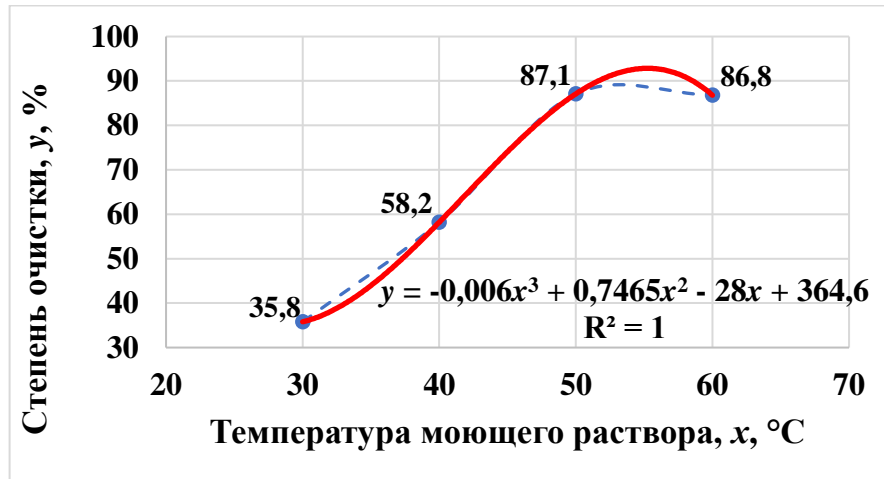
Внутри камеры (на корзине) размещена система крепления образцов, обеспечивающая их фиксацию в строго заданном положении относительно источников воздействия (центрифуга, форсунки). Конструкция крепления позволяет оперативно производить смену каждого отдельного образца без снятия других образцов и без демонтажа узлов установки.

Установка обеспечивает эффективное удаление сложных многокомпонентных загрязнений при сохранении целостности обрабатываемых поверхностей.

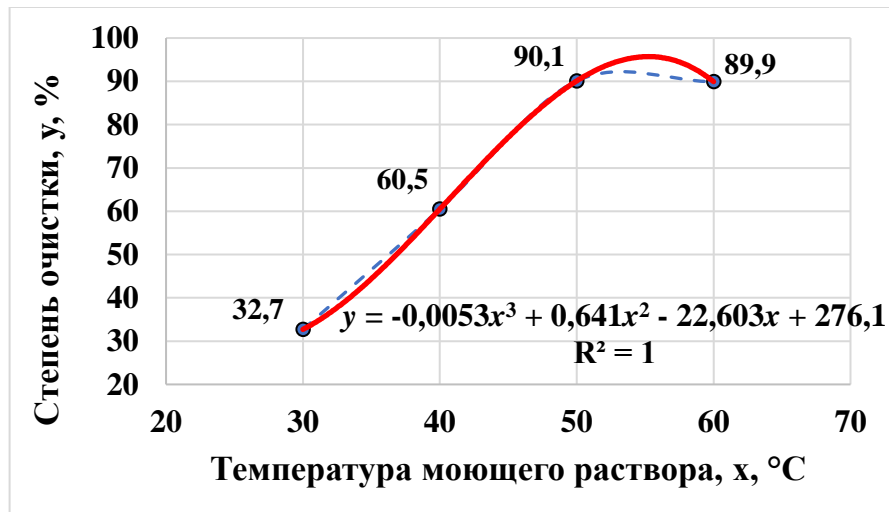
Продолжение приложения В



а)

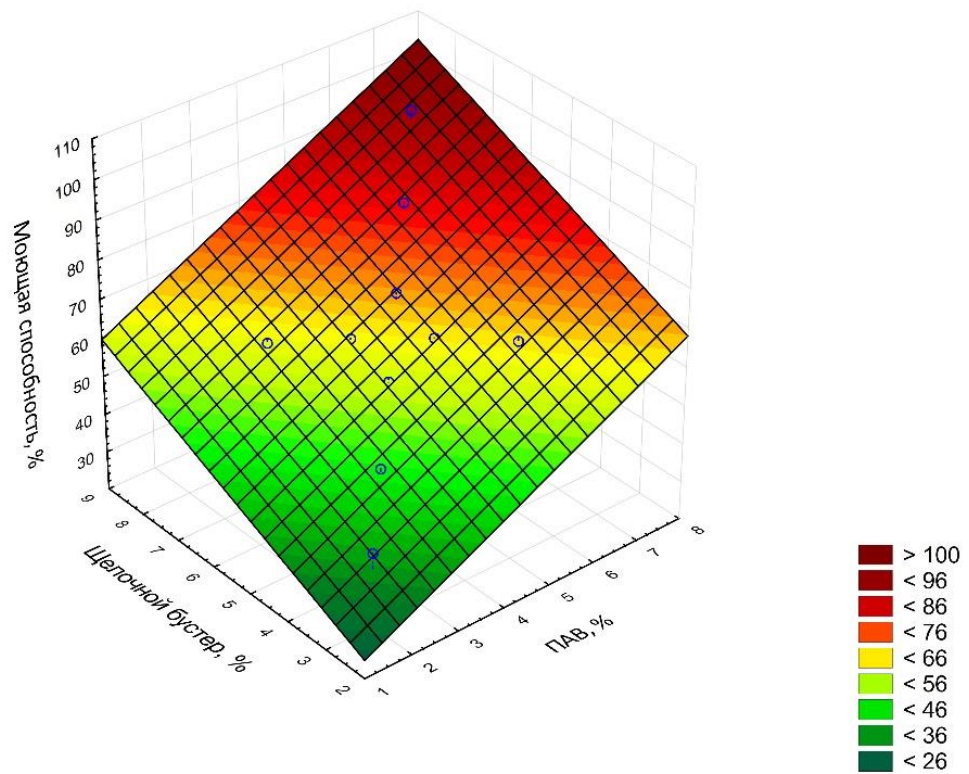
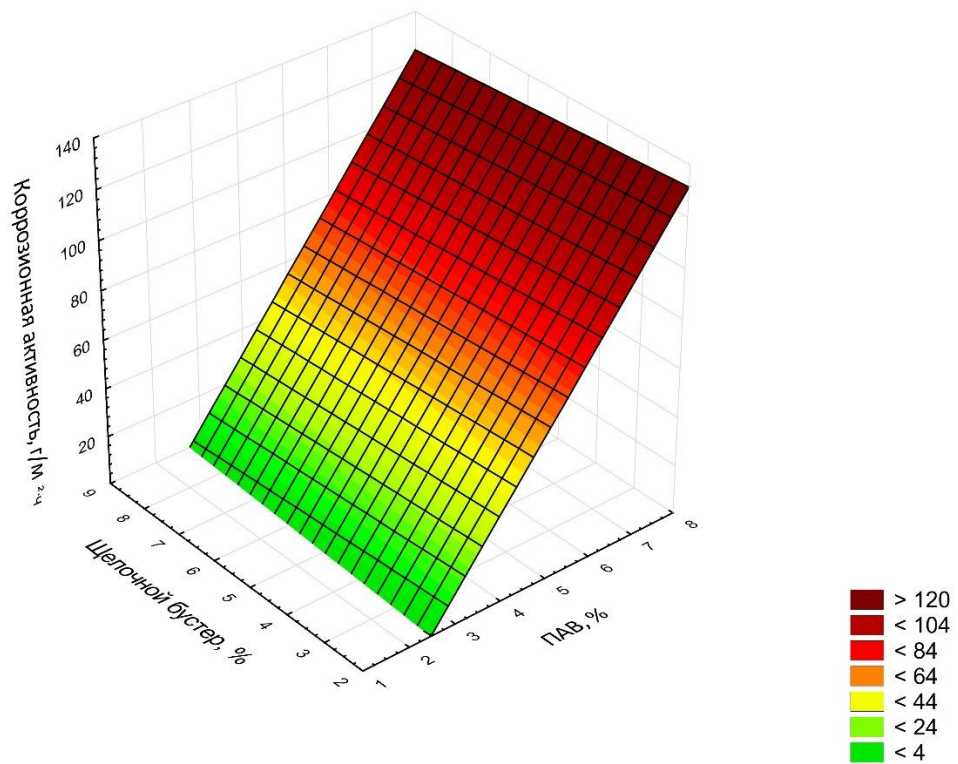


б)



в)

Рисунок В.4 – Зависимость моющей способности растворов разных рецептов от температуры: а) – рецептура А; б) – рецептура Б; в) – рецептура В

Рисунок В.5 – Поверхность отклика для функций Y_1 Рисунок В.6 – Поверхность отклика для функций Y_2

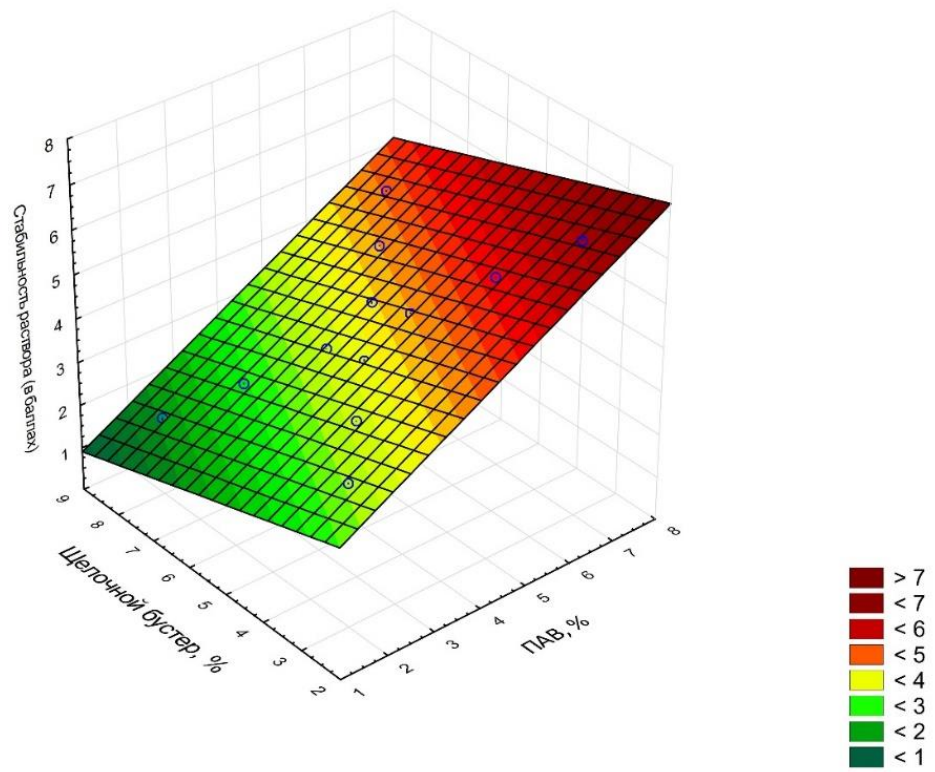


Рисунок В.7 – Поверхность отклика для функций Y_3

Продолжение приложения В

Таблица В.1 – Зависимость моющей способности растворов разных рецептов от температуры

Темпе- ратура, °С	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рецептура А									
30	1	117,5612	120,4723	2,9111	119,1943	1,6331	1,2780	43,9	44,2
	2	117,8232	121,0042	3,1810	119,6014	1,7782	1,4028	44,1	
	3	117,9717	121,1726	3,2009	120,0651	2,0934	1,1075	44,6	
40	4	117,6371	120,7582	3,1211	118,7076	1,0705	2,0506	65,7	65,4
	5	117,4923	120,8632	3,3709	118,6654	1,1731	2,1978	65,2	
	6	117,6434	120,5241	2,8807	118,6430	0,9996	1,8811	65,3	
50	7	117,4321	120,9523	3,5202	117,6644	0,2323	3,2879	93,4	93,9
	8	117,5136	120,8831	3,3695	117,7124	0,1988	3,1707	94,1	
	9	117,8442	121,2454	3,4012	118,0415	0,1973	3,2039	94,2	
60	10	117,9551	121,4246	3,4695	118,1980	0,2429	3,2266	93,0	92,8
	11	117,7223	1213328	3,6105	117,9895	0,2672	3,3433	92,6	
	12	117,5514	1207624	3,2110	117,7826	0,2312	2,9798	92,8	

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рецептура Б									
30	13	117,6934	121,0542	3,3608	119,8611	2,1677	1,1931	35,5	35,8
	14	117,9152	121,5464	3,6312	120,2428	2,3276	1,3036	35,9	
	15	118,1246	121,8547	3,7301	120,5119	2,3873	1,3428	36,0	
40	16	117,4625	120,8734	3,4109	118,8848	1,4223	1,9886	58,3	58,2
	17	117,5443	120,9144	3,3701	118,9597	1,4154	1,9547	58,0	
	18	117,6126	121,0841	3,4715	119,0602	1,4476	2,0239	58,3	
50	19	118,1543	121,8353	3,6810	118,6181	0,4638	3,2172	87,4	87,1
	20	117,7854	121,2544	3,4690	118,2329	0,4475	3,0215	87,1	
	21	117,6927	121,9426	4,2499	118,2537	0,5610	3,6889	86,8	
60	22	118,0528	121,9838	3,9310	118,5835	0,5307	3,4003	86,5	86,8
	23	117,9521	122,0522	4,1001	118,4974	0,5453	3,5548	86,7	
	24	117,8837	121,8539	3,9702	118,3919	0,5082	3,4620	87,2	
Рецептура С									
30	25	118,1342	122,3544	4,2202	120,9744	2,8402	1,3800	32,7	32,7
	26	117,9023	122,1224	4,2201	120,7509	2,8486	1,3715	32,5	
	27	117,7751	121,8766	4,1015	120,5272	2,7521	1,3494	32,9	
40	28	117,5328	121,7655	4,2327	119,1836	1,6508	2,5819	61,0	60,5
	29	118,1934	122,4238	4,2304	119,8813	1,6879	2,5425	60,1	
	30	117,4326	121,6445	4,2119	119,1005	1,6679	2,5440	60,4	
50	31	117,5032	121,8233	4,3201	117,9222	0,4190	3,9011	90,3	90,1
	32	117,6741	121,7348	4,0607	118,0761	0,4020	3,6587	90,1	
	33	118,1082	122,3692	4,2610	118,5386	0,4304	3,8306	89,9	

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
60	34	117,9291	122,1582	4,2291	118,3689	0,4398	3,7893	89,6	89,9
	35	118,0958	122,4556	4,3598	118,5318	0,4360	3,9238	90,0	
	36	117,9462	122,2271	4,2809	118,3657	0,4195	3,8614	90,2	

Продолжение приложения В

Таблица В.2 – Результаты экспериментов

№ опыта	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца, y _i	средняя по трем образцам, \bar{y}_j
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	117,5612	120,5176	2,9564	119,2197	1,6585	1,2979	43,9	43,7
	2	117,8232	121,1123	3,2891	119,6618	1,8386	1,4505	44,1	
	3	117,9717	121,2341	3,2624	119,8280	1,8563	1,4061	43,1	
2	4	117,6371	120,8117	3,1746	118,3450	0,7079	2,4667	77,7	78,2
	5	117,4923	120,9283	3,4360	118,2345	0,7422	2,6938	78,4	
	6	117,6434	120,7125	3,0691	118,3033	0,6599	2,4092	78,5	
3	7	117,4321	121,2153	3,7832	119,0059	1,5738	2,2094	58,4	57,9
	8	117,5136	121,0545	3,5409	119,0185	1,5049	2,0360	57,5	
	9	117,8442	121,1321	3,2879	119,2317	1,3875	1,9004	57,8	
4	10	117,9551	121,5325	3,5774	118,4917	0,5366	3,0408	85,0	84,8
	11	117,7223	121,5205	3,7982	118,3338	0,6115	3,1867	83,9	
	12	117,5514	121,1475	3,5961	118,0728	0,5214	3,0747	85,5	
5	13	117,6934	121,2152	3,5218	119,4120	1,7186	1,8032	51,2	50,8
	14	117,9152	121,3562	3,4410	119,5978	1,6826	1,7584	51,1	
	15	118,1246	121,4564	3,3318	119,7872	1,6626	1,6692	50,1	

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	16	117,4625	121,2526	3,7901	118,5654	1,1029	2,6872	70,9	71,3
	17	117,5443	121,1475	3,6032	118,5748	1,0305	2,5727	71,4	
	18	117,6126	120,8985	3,2859	118,5458	0,9332	2,3527	71,6	
7	19	118,1543	121,7623	3,6080	119,4387	1,2844	2,3236	64,4	64,1
	20	117,7854	121,3412	3,5558	119,0264	1,2410	2,3148	65,1	
	21	117,6927	121,6596	3,9669	119,1684	1,4757	2,4912	62,8	
8	22	118,0528	121,5459	3,4931	118,3148	0,2620	3,2311	92,5	91,8
	23	117,9521	121,8587	3,9066	118,2763	0,3242	3,5824	91,7	
	24	117,8837	121,7765	3,8928	118,2263	0,3426	3,5502	91,2	

Продолжение приложения В

Таблица В.3 – Зависимость моющей способности раствора от температуры

Температура, °С	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
30	1	117,5612	120,7682	3,2070	118,4527	0,8915	2,3155	72,2	71,3
	2	117,8232	121,3428	3,5196	118,8404	1,0172	2,5024	71,1	
	3	117,9717	120,5341	2,5624	118,6892	0,7175	1,8449	72,0	
40	4	117,6371	121,4746	3,8375	118,1897	0,5526	3,2849	85,6	85,4
	5	117,4923	120,8431	3,3508	117,9882	0,4959	2,8549	85,2	
	6	117,6434	121,1226	3,4792	118,1514	0,5080	2,9712	85,4	
50	7	117,4321	120,7824	3,3503	117,6197	0,1876	3,1627	94,4	94,6
	8	117,5136	120,8532	3,3396	117,7106	0,1970	3,1426	94,1	
	9	117,8442	121,2654	3,4212	118,0050	0,1608	3,2604	95,3	
60	10	117,9551	120,4523	2,4972	118,1249	0,1698	2,3274	93,2	93,5
	11	117,7223	121,1242	3,4019	117,9400	0,2177	3,1842	93,6	
	12	117,5514	120,9623	3,4109	117,7663	0,2149	3,1960	93,7	

Продолжение приложения В

Таблица В.4 – Влияние концентрации моющего средства на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при температуре раствора 50°C

Продолжительность мойки, мин	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Концентрация 1,0 %масс.									
2,0	1	117,5612	120,5176	2,9564	119,9795	2,4183	0,5381	18,2	18,4
	2	117,8232	121,1123	3,2891	120,5071	2,6839	0,6052	18,4	
	3	117,9717	121,2341	3,2624	120,6273	2,6556	0,6068	18,6	
5,0	4	117,6371	120,8117	3,1746	119,9990	2,3619	0,8127	25,6	25,6
	5	117,4923	120,9283	3,436	120,0452	2,5529	0,8831	25,7	
	6	117,6434	120,7125	3,0691	119,9299	2,2865	0,7826	25,5	
10,0	7	117,4321	121,2153	3,7832	119,9895	2,5574	1,2258	32,4	32,3
	8	117,5136	121,0545	3,5409	119,9179	2,4043	1,1366	32,1	
	9	117,8442	121,1321	3,2879	120,0668	2,2226	1,0653	32,4	
15,0	10	117,9551	121,5325	3,5774	119,6293	1,6742	1,9032	53,2	53,5
	11	117,7223	121,5205	3,7982	119,4847	1,7624	2,0358	53,6	
	12	117,5514	121,1475	3,5961	119,2164	1,6650	1,9311	53,7	
20,0	13	117,6934	121,2152	3,5218	118,7077	1,0143	2,5075	71,2	71,3
	14	117,9152	121,3562	3,441	118,9096	0,9944	2,4466	71,1	
	15	118,1246	121,4564	3,3318	119,0708	0,9462	2,3856	71,6	

Продолжение таблицы В.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30,0	16	117,4625	121,2526	3,7901	118,1296	0,6671	3,1230	82,4	82,3
	17	117,5443	121,1475	3,6032	118,0776	0,5333	3,0699	85,2	
	18	117,6126	120,8985	3,2859	118,1909	0,5783	2,7076	82,4	
Концентрация 2,0 %масс.									
2,0	19	118,1543	121,7623	3,608	120,8819	2,7276	0,8804	24,4	24,6
	20	117,7854	121,3412	3,5558	120,4843	2,6989	0,8569	24,1	
	21	117,6927	121,6596	3,9669	120,6560	2,9633	1,0036	25,3	
5,0	22	118,0528	121,5459	3,4931	120,2115	2,1587	1,3344	38,2	38,5
	23	117,9521	121,8587	3,9066	120,3508	2,3987	1,5079	38,6	
	24	117,8837	121,7765	3,8928	120,2700	2,3863	1,5065	38,7	
10,0	25	117,3217	121,2582	3,9365	119,2427	1,9210	2,0155	51,2	51,3
	26	117,6559	121,1128	3,4569	119,3463	1,6904	1,7665	51,1	
	27	117,8521	120,9241	3,072	119,3389	1,4868	1,5852	51,6	
15,0	28	117,7532	121,3446	3,5914	118,9168	1,1636	2,4278	67,6	67,4
	29	117,5124	120,9231	3,4107	118,6311	1,1187	2,2920	67,2	
	30	117,4568	120,7326	3,2758	118,5247	1,0679	2,2079	67,4	
20,0	31	117,8256	121,3224	3,4968	118,6159	0,7903	2,7065	77,4	77,6
	32	117,4613	120,7232	3,2619	118,1822	0,7209	2,5410	77,9	
	33	117,5897	120,7154	3,1257	118,2930	0,7033	2,4224	77,5	
30,0	34	117,8659	121,2523	3,3864	118,4010	0,5351	2,8513	84,2	84,5
	35	117,5689	120,8642	3,2953	118,0764	0,5075	2,7878	84,6	
	36	117,3263	120,8723	3,546	117,8688	0,5425	3,0035	84,7	

Продолжение таблицы В.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Концентрация 3,0 %масс.									
2,0	37	117,6205	121,1724	3,5519	119,9505	2,3300	1,2219	34,4	34,6
	38	117,7531	120,9332	3,1801	119,8488	2,0957	1,0844	34,1	
	39	117,9514	120,8854	2,934	119,8497	1,8983	1,0357	35,3	
5,0	40	117,9551	120,9823	3,0272	119,3718	1,4167	1,6105	53,2	53,5
	41	117,2850	121,2242	3,9392	119,1128	1,8278	2,1114	53,6	
	42	117,4650	121,2323	3,7673	119,2093	1,7443	2,0230	53,7	
10,0	43	117,3468	120,9482	3,6014	118,4920	1,1452	2,4562	68,2	68,3
	44	117,9876	121,2728	3,2852	119,0356	1,0480	2,2372	68,1	
	45	117,8649	120,6741	2,8092	118,7470	0,8821	1,9271	68,6	
15,0	46	117,7845	121,7646	3,9801	118,3576	0,5731	3,4070	85,6	85,4
	47	117,2563	121,2731	4,0168	117,8508	0,5945	3,4223	85,2	
	48	117,3164	121,2526	3,9362	117,8911	0,5747	3,3615	85,4	
20,0	49	117,2358	120,9224	3,6866	117,5897	0,3539	3,3327	90,4	90,6
	50	117,7985	120,7632	2,9647	118,0920	0,2935	2,6712	90,1	
	51	117,9563	121,1754	3,2191	118,2364	0,2801	2,9390	91,3	
30,0	52	117,8624	120,9923	3,1299	118,0439	0,1815	2,9484	94,2	94,5
	53	117,7659	120,9442	3,1783	117,9375	0,1716	3,0067	94,6	
	54	117,6487	120,8823	3,2336	117,8201	0,1714	3,0622	94,7	
Концентрация 5,0 %масс.									
2,0	55	117,5432	120,7624	3,2192	119,5262	1,9830	1,2362	38,4	38,6
	56	117,4987	120,9732	3,4745	119,6147	2,1160	1,3585	39,1	
	57	117,8453	121,3154	3,4701	119,9864	2,1411	1,3290	38,3	

Продолжение таблицы В.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5,0	58	117,8506	120,8623	3,0117	119,1396	1,2890	1,7227	57,2	57,5
	59	117,4785	120,9342	3,4557	118,9437	1,4652	1,9905	57,6	
	60	117,6542	120,8223	3,1681	118,9943	1,3401	1,8280	57,7	
10,0	61	117,6658	120,8982	3,2324	118,5967	0,9309	2,3015	71,2	71,3
	62	117,9648	121,2728	3,308	118,9208	0,9560	2,3520	71,1	
	63	117,8859	120,8641	2,9782	118,7317	0,8458	2,1324	71,6	
15,0	64	117,7548	121,3346	3,5798	118,1736	0,4188	3,1610	88,3	88,3
	65	117,5532	120,9231	3,3699	117,9508	0,3976	2,9723	88,2	
	66	117,7447	121,3426	3,5979	118,1621	0,4174	3,1805	88,4	
20,0	67	117,5745	120,8224	3,2479	117,8213	0,2468	3,0011	92,4	92,5
	68	117,5125	120,7332	3,2207	117,7541	0,2416	2,9791	92,5	
	69	117,8453	121,1854	3,3401	118,0925	0,2472	3,0929	92,6	
30,0	70	117,8576	120,5723	2,7147	117,9798	0,1222	2,5925	95,5	95,6
	71	117,6985	121,2342	3,5357	117,8541	0,1556	3,3801	95,6	
	72	117,7746	121,2323	3,4577	117,9233	0,1487	3,3090	95,7	

Продолжение приложения В

Таблица В.5 – Влияние температуры раствора на кинетику процесса мойки в иммерсионном режиме с перемешиванием при концентрации моющего средства 3 %масс.

Продолжительность мойки, мин	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура раствора 30°C									
2,0	1	117,5612	120,3376	2,7764	119,6796	2,1184	0,6580	23,7	23,6
	2	117,8232	121,4323	3,6091	120,5842	2,7610	0,8481	23,5	
	3	117,9717	121,3244	3,3527	120,5332	2,5615	0,7912	23,6	
5,0	4	117,6371	120,7317	3,0946	119,6764	2,0393	1,0553	34,1	34,2
	5	117,4923	120,8687	3,3764	119,6971	2,2048	1,1716	34,7	
	6	117,6434	120,8325	3,1891	119,7546	2,1112	1,0779	33,8	
10,0	7	117,4321	121,1953	3,7632	119,6373	2,2052	1,5580	41,4	41,7
	8	117,5136	121,1245	3,6109	119,6043	2,0907	1,5202	42,1	
	9	117,8442	121,2521	3,4079	119,8344	1,9902	1,4177	41,6	
15,0	10	117,9551	121,6305	3,6754	119,4179	1,4628	2,2126	60,2	60,2
	11	117,7223	121,4615	3,7392	119,1955	1,4732	2,2660	60,6	
	12	117,5514	121,2575	3,7061	119,0413	1,4899	2,2162	59,8	
20,0	13	117,6934	121,3812	3,6878	118,6817	0,9883	2,6995	73,2	73,5
	14	117,9152	121,6432	3,728	118,8957	0,9805	2,7475	73,7	
	15	118,1246	121,2244	3,0998	118,9429	0,8183	2,2815	73,6	

Продолжение таблицы В.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30,0	16	117,4625	121,3536	3,8911	118,0267	0,5642	3,3269	85,5	85,2
	17	117,5443	121,2365	3,6922	118,0907	0,5464	3,1458	85,2	
	18	117,6126	120,7665	3,1539	118,0888	0,4762	2,6777	84,9	
Температура раствора 40°C									
2,0	19	118,1543	121,8753	3,721	120,7516	2,5973	1,1237	30,2	30,2
	20	117,7854	121,4522	3,6668	120,3485	2,5631	1,1037	30,1	
	21	117,6927	121,5226	3,8299	120,3621	2,6694	1,1605	30,3	
5,0	22	118,0528	121,6819	3,6291	120,1758	2,1230	1,5061	41,5	41,7
	23	117,9521	121,7637	3,8116	120,1666	2,2145	1,5971	41,9	
	24	117,8837	121,5845	3,7008	120,0413	2,1576	1,5432	41,7	
10,0	25	117,3217	121,2582	3,9365	118,9475	1,6258	2,3107	58,7	58,8
	26	117,6559	121,2368	3,5809	119,1205	1,4646	2,1163	59,1	
	27	117,8521	120,8691	3,017	119,1011	1,2490	1,7680	58,6	
15,0	28	117,7532	121,5226	3,7694	118,7973	1,0441	2,7253	72,3	72,3
	29	117,5124	120,8751	3,3627	118,4472	0,9348	2,4279	72,2	
	30	117,4568	120,8106	3,3538	118,3824	0,9256	2,4282	72,4	
20,0	31	117,8256	121,4674	3,6418	118,2918	0,4662	3,1756	87,2	87,2
	32	117,4613	120,8052	3,3439	117,8994	0,4381	2,9058	86,9	
	33	117,5897	120,6461	3,0564	117,9718	0,3821	2,6744	87,5	
30,0	34	117,8659	121,4430	3,5771	118,1771	0,3112	3,2659	91,3	91,2
	35	117,5689	120,9242	3,3553	117,8507	0,2818	3,0735	91,6	
	36	117,3263	120,7783	3,452	117,6473	0,3210	3,1310	90,7	

Продолжение таблицы В.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура раствора 50°C									
2,0	37	117,6205	121,2114	3,5909	119,8684	2,2479	1,3430	37,4	37,7
	38	117,7531	120,8632	3,1101	119,6969	1,9438	1,1663	37,5	
	39	117,9514	120,9164	2,965	119,7808	1,8294	1,1356	38,3	
5,0	40	117,9551	120,8793	2,9242	119,2944	1,3393	1,5849	54,2	53,9
	41	117,2850	121,3522	4,0672	119,1640	1,8790	2,1882	53,8	
	42	117,4650	121,3463	3,8813	119,2620	1,7970	2,0843	53,7	
10,0	43	117,3468	120,8752	3,5284	118,4300	1,0832	2,4452	69,3	69,4
	44	117,9876	121,1978	3,2102	118,9796	0,9920	2,2182	69,1	
	45	117,8649	120,5691	2,7042	118,6816	0,8167	1,8875	69,8	
15,0	46	117,7845	121,8846	4,1001	118,3339	0,5494	3,5507	86,6	86,3
	47	117,2563	121,2261	3,9698	117,7962	0,5399	3,4299	86,4	
	48	117,3164	121,3466	4,0302	117,8847	0,5683	3,4619	85,9	
20,0	49	117,2358	120,8724	3,6366	117,5413	0,3055	3,3311	91,6	91,2
	50	117,7985	120,8232	3,0247	118,1100	0,3115	2,7132	89,7	
	51	117,9563	121,2354	3,2791	118,2416	0,2853	2,9938	91,3	
30,0	52	117,8624	120,8763	3,0139	118,0071	0,1447	2,8692	95,2	94,8
	53	117,7659	120,8742	3,1083	117,9369	0,1710	2,9373	94,5	
	54	117,6487	120,9233	3,2746	117,8223	0,1736	3,1010	94,7	
Температура раствора 60°C									
2,0	55	117,5432	120,8824	3,3392	119,4966	1,9534	1,3858	41,5	41,3
	56	117,4987	120,5432	3,0445	119,2919	1,7932	1,2513	41,1	
	57	117,8453	121,2254	3,3801	119,8294	1,9841	1,3960	41,3	

Продолжение таблицы В.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5,0	58	117,8506	120,7923	2,9417	119,0832	1,2326	1,7091	58,1	57,8
	59	117,4785	120,8642	3,3857	118,9140	1,4355	1,9502	57,6	
	60	117,6542	120,7123	3,0581	118,9478	1,2936	1,7645	57,7	
10,0	61	117,6658	120,9282	3,2624	118,5662	0,9004	2,3620	72,4	72,5
	62	117,9648	121,3328	3,368	118,8977	0,9329	2,4351	72,3	
	63	117,8859	120,7241	2,8382	118,6579	0,7720	2,0662	72,8	
15,0	64	117,7548	121,4846	3,7298	118,1539	0,3991	3,3307	89,3	89,1
	65	117,5532	120,7631	3,2099	117,9191	0,3659	2,8440	88,6	
	66	117,7447	121,3556	3,6109	118,1275	0,3828	3,2281	89,4	
20,0	67	117,5745	120,8694	3,2949	117,7920	0,2175	3,0774	93,4	93,7
	68	117,5125	120,7762	3,2637	117,7214	0,2089	3,0548	93,6	
	69	117,8453	121,3454	3,5001	118,0518	0,2065	3,2936	94,1	
30,0	70	117,8576	120,6323	2,7747	117,9547	0,0971	2,6776	96,5	96,4
	71	117,6985	121,3542	3,6557	117,8228	0,1243	3,5314	96,6	
	72	117,7746	121,1893	3,4147	117,9078	0,1332	3,2815	96,1	

Продолжение приложения В

Таблица В.6 – Влияние гидродинамического режима на кинетику процесса мойки при температуре раствора 50°C и концентрации оптимизированного состава 3% масс.

Продолжительность мойки, мин	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Иммерсионный без перемешивания									
2,0	1	117,5612	120,8756	3,3144	120,1232	2,5620	0,7524	22,7	22,8
	2	117,8232	121,3183	3,4951	120,5319	2,7087	0,7864	22,5	
	3	117,9717	121,2444	3,2727	120,4851	2,5134	0,7593	23,2	
5,0	4	117,6371	120,7522	3,1151	119,6276	1,9905	1,1246	36,1	35,7
	5	117,4923	120,7927	3,3004	119,6145	2,1222	1,1782	35,7	
	6	117,6434	120,9315	3,2881	119,7675	2,1241	1,1640	35,4	
10,0	7	117,4321	121,2143	3,7822	119,0811	1,6490	2,1332	56,4	56,6
	8	117,5136	121,2347	3,7211	119,1211	1,6075	2,1136	56,8	
	9	117,8442	121,3224	3,4782	119,3537	1,5095	1,9687	56,6	
15,0	10	117,9551	121,6411	3,6860	119,0535	1,0984	2,5876	70,2	70,3
	11	117,7223	121,5615	3,8392	118,8510	1,1287	2,7105	70,6	
	12	117,5514	121,2841	3,7327	118,6675	1,1161	2,6166	70,1	
20,0	13	117,6934	121,4112	3,7178	118,4890	0,7956	2,9222	78,6	78,9
	14	117,9152	121,7132	3,7980	118,7242	0,8090	2,9890	78,7	
	15	118,1246	121,2573	3,1327	118,7699	0,6453	2,4874	79,4	

Продолжение таблицы В.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
30,0	16	117,4625	121,3256	3,8631	117,9840	0,5215	3,3416	86,5	86,3
	17	117,5443	121,4265	3,8822	118,0800	0,5357	3,3465	86,2	
	18	117,6126	120,7415	3,1289	118,0444	0,4318	2,6971	86,2	
Иммерсионный с перемешиванием									
2,0	19	118,1543	121,7653	3,6110	120,5484	2,3941	1,2169	33,7	33,8
	20	117,7854	121,4644	3,6790	120,2099	2,4245	1,2545	34,1	
	21	117,6927	121,6726	3,9799	120,3354	2,6427	1,3372	33,6	
5,0	22	118,0528	121,5939	3,5411	119,8800	1,8272	1,7139	48,4	48,7 в 2,3 раза
	23	117,9521	121,7518	3,7997	119,8937	1,9416	1,8581	48,9	
	24	117,8837	121,6425	3,7588	119,8082	1,9245	1,8343	48,8	
10,0	25	117,3217	121,3642	4,0425	118,6072	1,2855	2,7570	68,2	68,3
	26	117,6559	121,3568	3,7009	118,8365	1,1806	2,5203	68,1	
	27	117,8521	120,9011	3,0490	118,8095	0,9574	2,0916	68,6	
15,0	28	117,7532	121,5106	3,7574	118,4558	0,7026	3,0548	81,3	81,5
	29	117,5124	120,7951	3,2827	118,1099	0,5975	2,6852	81,8	
	30	117,4568	120,8336	3,3768	118,0849	0,6281	2,7487	81,4	
20,0	31	117,8256	121,6475	3,8219	118,1619	0,3363	3,4856	91,2	91,2
	32	117,4613	120,9152	3,4539	117,7722	0,3109	3,1430	91,0	
	33	117,5897	120,7261	3,1364	117,8594	0,2697	2,8667	91,4	
30,0	34	117,8659	121,5281	3,6622	118,0600	0,1941	3,4681	94,7	94,8
	35	117,5689	120,8942	3,3253	117,7485	0,1796	3,1457	94,6	
	36	117,3263	120,7823	3,4560	117,4956	0,1693	3,2867	95,1	

Продолжение таблицы В.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Струйная обработка (давление 0,3 МПа)									
2,0	37	117,6205	121,1814	3,5609	119,9137	2,2932	1,2677	35,6	35,9
	38	117,7531	120,9232	3,1701	119,7883	2,0352	1,1349	35,8	
	39	117,9514	120,9214	2,9700	119,8433	1,8919	1,0781	36,3	
5,0	40	117,9551	120,7694	2,8143	119,3200	1,3649	1,4494	51,5	51,8
	41	117,2850	121,3632	4,0782	119,2344	1,9494	2,1288	52,2	
	42	117,4650	121,4363	3,9713	119,3831	1,9181	2,0532	51,7	
10,0	43	117,3468	120,8832	3,5364	118,2910	0,9442	2,5922	73,3	73,6 Линейно
	44	117,9876	121,2058	3,2182	118,8340	0,8464	2,3718	73,7	
	45	117,8649	120,5711	2,7062	118,5739	0,7090	1,9972	73,8	
15,0	46	117,7845	121,7956	4,0111	118,2819	0,4974	3,5137	87,6	87,4 замедлен ие
	47	117,2563	121,3761	4,1198	117,7754	0,5191	3,6007	87,4	
	48	117,3164	121,5646	4,2482	117,8602	0,5438	3,7044	87,2	
20,0	49	117,2358	120,9424	3,7066	117,5175	0,2817	3,4249	92,4	92,3
	50	117,7985	120,8732	3,0747	118,0383	0,2398	2,8349	92,2	
	51	117,9563	121,3554	3,3991	118,2180	0,2617	3,1374	92,3	
30,0	52	117,8624	120,4663	2,6039	117,9613	0,0989	2,5050	96,2	95,8
	53	117,7659	120,7942	3,0283	117,9022	0,1363	2,8920	95,5	
	54	117,6487	120,9115	3,2628	117,7890	0,1403	3,1225	95,7	

Продолжение таблицы В.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Комбинированный режим (15 мин)									
1-й этап – Иммерсионный без перемешивания									
5,0	55	117,5432	120,7764	3,2332	119,5963	2,0531	1,1801	36,5	36,1
	56	117,4987	120,6932	3,1945	119,5400	2,0413	1,1532	36,1	
	57	117,8453	121,1194	3,2741	119,9505	2,1052	1,1689	35,7	
2-й этап – Иммерсионный с перемешиванием									
5,0	58	117,8506	120,8173	2,9667	118,2214	0,3708	2,5959	87,5	87,6
	59	117,4785	120,8332	3,3547	117,8945	0,4160	2,9387	87,6	
	60	117,6542	120,7458	3,0916	118,0345	0,3803	2,7113	87,7	
3-й этап – Струйный режим (давление 0,3 МПа)									
5,0	61	117,6658	120,8762	3,2104	117,7300	0,0642	3,1462	98,0	98,2
	62	117,9648	121,4618	3,4970	118,0242	0,0594	3,4376	98,3	
	63	117,8859	120,8341	2,9482	117,9360	0,0501	2,8981	98,3	

Продолжение приложения В

Таблица В.7 – Результаты экспериментов

№ варианта	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %		Дисперсия построчная, $S_j^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_j - \bar{y}_j)^2}{m - 1}$
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	117,5612	121,1523	3,5911	120,2294	2,6682	0,9229	25,7	25,8	0,65
	2	117,8232	121,4752	3,6520	120,5439	2,7207	0,9313	25,5		
	3	117,9717	122,1124	4,1407	121,0275	3,0558	1,0849	26,2		
2	4	117,6371	121,2375	3,6004	119,8297	2,1926	1,4078	39,1	38,7	0,65
	5	117,4923	120,9857	3,4934	119,6372	2,1449	1,3485	38,6		
	6	117,6434	121,2564	3,6130	119,8690	2,2256	1,3874	38,4		
3	7	117,4321	121,5258	4,0937	120,2404	2,8083	1,2854	31,4	31,6	0,20
	8	117,5136	121,8463	4,3327	120,4685	2,9549	1,3778	31,8		
	9	117,8442	122,1224	4,2782	120,7705	2,9263	1,3519	31,6		
4	10	117,9551	122,3465	4,3914	120,2298	2,2747	2,1167	48,2	48,3	0,75
	11	117,7223	122,0254	4,3031	119,9341	2,2118	2,0913	48,6		
	12	117,5514	121,9956	4,4442	119,8579	2,3065	2,1377	48,1		
5	13	117,6934	121,9857	4,2923	120,6293	2,9359	1,3564	31,6	31,9	0,95
	14	117,9152	122,2431	4,3279	120,8712	2,9560	1,3719	31,7		
	15	118,1246	122,5876	4,4630	121,1416	3,0170	1,4460	32,4		

Продолжение таблицы В.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	16	117,4625	121,8956	4,4331	119,3466	1,8841	2,5490	57,5	57,3	0,15
	17	117,5443	121,9887	4,4444	119,4465	1,9022	2,5422	57,2		
	18	117,6126	121,5889	3,9763	119,3145	1,7019	2,2744	57,2		
Пр7	19	118,1543	122,5248	4,3705	120,5275	2,3732	1,9973	45,7	45,8	0,30
	20	117,7854	122,1243	4,3389	120,1241	2,3387	2,0002	46,1		
	21	117,6927	121,9888	4,2961	120,0298	2,3371	1,9590	45,6		
8	22	118,0528	122,3465	4,2937	118,8085	0,7557	3,5380	82,4	82,7	0,35
	23	117,9521	122,2164	4,2643	118,6813	0,7292	3,5351	82,9		
	24	117,8837	122,5423	4,6586	118,685	0,8013	3,8573	82,8		
9	25	117,3217	121,8756	4,5539	120,3637	3,0420	1,5119	33,2	33,3	0,35
	26	117,6559	121,9958	4,3399	120,5593	2,9034	1,4365	33,1		
	27	117,8521	122,5746	4,7225	120,9878	3,1357	1,5868	33,6		
10	28	117,7532	122,4652	4,7120	119,5296	1,7764	2,9356	62,3	62,5	0,35
	29	117,5124	121,8520	4,3396	119,1267	1,6143	2,7253	62,8		
	30	117,4568	121,8526	4,3958	119,1096	1,6528	2,7430	62,4		
11	31	117,8256	122,2875	4,4619	120,4046	2,5790	1,8829	42,2	42,2	0,20
	32	117,4613	121,9342	4,4729	120,0556	2,5943	1,8786	42,0		
	33	117,5897	121,7285	4,1388	119,9736	2,3839	1,7549	42,4		
12	34	117,8659	122,6831	4,8172	119,47	1,6041	3,2131	66,7	66,8	0,35
	35	117,5689	121,9942	4,4253	119,047	1,4781	2,9472	66,6		
	36	117,3263	121,8587	4,5324	118,8175	1,4912	3,0412	67,1		

Продолжение таблицы В.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
13	37	117,6205	121,8814	4,2609	119,8532	2,2327	2,0282	47,6	47,9	1,15
	38	117,7531	121,9472	4,1941	119,9424	2,1893	2,0048	47,8		
	39	117,9514	122,4314	4,4800	120,2676	2,3162	2,1638	48,3		
14	40	117,9551	122,1894	4,2343	118,4844	0,5293	3,7050	87,5	87,8	0,65
	41	117,2850	121,8532	4,5682	117,824	0,5390	4,0292	88,2		
	42	117,4650	121,9583	4,4933	118,0177	0,5527	3,9406	87,7		
15	43	117,3468	121,8922	4,5454	119,3786	2,0318	2,5136	55,3	55,6	0,35
	44	117,9876	122,3358	4,3482	119,9139	1,9263	2,4219	55,7		
	45	117,8649	122,5318	4,6669	119,9277	2,0628	2,6041	55,8		
16	46	117,7845	122,8256	5,0411	117,8551	0,0706	4,9705	98,6	98,4	0,20
	47	117,2563	121,8661	4,6098	117,3301	0,0738	4,5360	98,4		
	48	117,3164	121,9746	4,6582	117,4002	0,0838	4,5744	98,2		

$$\sum_{j=1}^m S_j^2 = 7,60.$$

Продолжение приложения В

Таблица В.8 – Влияние количества циклов мойки на моющую способность при температуре раствора 50°C, концентрации состава 3% масс. и продолжительности комбинированной мойки 15 мин (без регенерации раствора)

Количество циклов мойки	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
5	1	117,5612	121,3158	3,7546	117,8390	0,2778	3,4768	92,6	92,1
	2	117,8232	121,2617	3,4385	118,0845	0,2613	3,1772	92,4	
	3	117,9717	121,1335	3,1618	118,2499	0,2782	2,8836	91,2	
10	4	117,6371	121,0255	3,3884	118,1386	0,5015	2,8869	85,2	85,3
	5	117,4923	120,8204	3,3281	117,9682	0,4759	2,8522	85,7	
	6	117,6434	120,8730	3,2296	118,1278	0,4844	2,7452	85,0	
15	7	117,4321	121,1178	3,6857	118,2909	0,8588	2,8269	76,7	76,8
	8	117,5136	121,3159	3,8023	118,3957	0,8821	2,9202	76,8	
	9	117,8442	121,4187	3,5745	118,6699	0,8257	2,7488	76,9	
20	10	117,9551	121,7254	3,7703	119,3388	1,3837	2,3866	63,3	63,2
	11	117,7223	121,4356	3,7133	119,0739	1,3516	2,3617	63,6	
	12	117,5514	121,3450	3,7936	118,9664	1,4150	2,3786	62,7	
25	13	117,6934	121,5206	3,8272	119,5458	1,8524	1,9748	51,6	51,4
	14	117,9152	121,6456	3,7304	119,7394	1,8242	1,9062	51,1	
	15	118,1246	121,4824	3,3578	119,7531	1,6285	1,7293	51,5	

Продолжение приложения В

Таблица В.9 – Влияние количества циклов мойки на восстановление моющей способности раствора после регенерации

Количество циклов мойки	№ образца	Масса, г						Степень очистки, %	
		чистого образца, (M ₁)	образца с загрязнением, (M ₂)	загрязнения до мойки, (M ₂ -M ₁)	образца после мойки, (M ₃)	загрязнения после мойки, (M ₃ -M ₁)	удаленного загрязнения, (M ₂ -M ₃)	образца	средняя по трем образцам
5	1	117,5612	121,1543	3,5931	117,8307	0,2695	3,3236	92,5	92,1
	2	117,8232	121,3124	3,4892	118,0919	0,2687	3,2205	92,3	
	3	117,9717	121,2561	3,2844	118,2509	0,2792	3,0052	91,5	
10	4	117,6371	121,1205	3,4834	118,0481	0,4110	3,0724	88,2	88,2
	5	117,4923	120,9155	3,4232	117,9134	0,4211	3,0021	87,7	
	6	117,6434	120,9722	3,3288	118,0196	0,3762	2,9526	88,7	
15	7	117,4321	121,2145	3,7824	118,0108	0,5787	3,2037	84,7	84,7
	8	117,5136	121,1356	3,622	118,0641	0,5505	3,0715	84,8	
	9	117,8442	121,2585	3,4143	118,3700	0,5258	2,8885	84,6	
20	10	117,9551	121,6684	3,7133	118,5789	0,6238	3,0895	83,2	83,5
	11	117,7223	121,5326	3,8103	118,3472	0,6249	3,1854	83,6	
	12	117,5514	121,2541	3,7027	118,1920	0,6406	3,0621	82,7	
25	13	117,6934	121,4685	3,7751	118,5013	0,8079	2,9672	78,6	78,4
	14	117,9152	121,5326	3,6174	118,7074	0,7922	2,8252	78,1	
	15	118,1246	121,3958	3,2712	118,8279	0,7033	2,5679	78,5	
30	16	117,4625	121,1964	3,7339	118,5603	1,0978	2,6361	70,6	70,8
	17	117,5443	121,1463	3,602	118,5853	1,0410	2,5610	71,1	
	18	117,6126	120,8411	3,2285	118,5586	0,9460	2,2825	70,7	

Продолжение приложения В

Таблица В.10 – Характеристика типовых деталей

Наименование детали	Принадлежность к агрегату	Материал	Характер поверхности и особенности	Средняя условно чистая масса, $M_1^{усл}$, г
1	2	3	4	5
Шестерня ведущая ВОМ	Трансмиссия трактора МТЗ-82	Сталь 25ХГТ	Сложно профильная поверхность	3551,17
Крышка ГБЦ	Двигатель трактора МТЗ-82	Алюминиевый сплав	Плоскостная деталь (нагар и отложения)	4022,32
Корпус масляного фильтра	Двигатель трактора МТЗ-82	Чугун СЧ20	С внутренними полостями и каналами	1805,51
Гидрораспре делитель в сборе	Гидросистема трактора МТЗ-82	Сталь, с деталями из ЦМ	С прецизионными поверхностями	8075,14
Фланец карданного вала	Трансмиссия трактора К-701	Кованая сталь	Массивная, загрязнённая консистентной смазкой	5017,22
Корпус клапана гидросистемы	Гидросистема трактора К-701	Чугун СЧ20	Имеет сложные внутренние полости	4125,45
Поршень тормозной системы	Тормозная система трактора К-701	Сталь 25ХГТ	Продукты износа и тормозной жидкости	817,64
Корпус турбокомпрессора	Двигатель автомобиля КамАЗ	Жаропрочная сталь 40Х10С2М	С каналами для масла и выхлопных газов, закоксованная маслами	6217,86

Продолжение таблицы В.10

1	2	3	4	5
Головка блока цилиндров	Двигатель автомобиля КамАЗ	Алюминиевый сплав	С водяными и масляными рубашками	18325,33
Подшипниковый корпус шнека жатки	Жатка комбайна «Дон-1500»	Сталь 25ХГТ	Работает в условиях сильного абразивного износа	6117,23
Шестерня привода мотовила	Мотовила комбайна «Дон-1500»	Сталь 25ХГТ	Подвержена воздействию растительных соков, почвы, пыли	2531,46
Поршень	Двигатель трактора МТЗ-82	Алюминиевый сплав АЛ25	Сложнопрофильная поверхность с продуктами абразивного износа и коррозии	1402,21
Клапан выпускной	Двигатель автомобиля КамАЗ	Жаростойкая сталь 40Х10С2М	Подвержен нагарообразованию	181,53
Крышка коренного подшипника	Двигатель комбайна «Дон-1500»	Чугун СЧ20	Плоскостная деталь с посадочными отверстиями	2,5
Шестерня 2-й передачи	Коробка передач трактора МТЗ-82	Сталь 25ХГТ	Продукты износа и заедания	3017,54

Продолжение приложения В

Таблица В.11 – Степень очистки деталей, вымытых по базовой и испытываемой технологиям в производственных условиях, по циклам (на примере партии деталей из (№1) – ГБЦ (КамАЗ) алюминиевый сплав, (№2) – шестерни ВОМ (МТЗ-82) Сталь 25ХГТ, (№3) – корпуса клапана гидросистемы (К-701) Чугун СЧ20)

Количество циклов мойки	№ детал и	Масса, г						Степень очистки, %	
		условно чистой детали, ($M_1^{усл}$)	детали с загрязнением до мойки, (M_2)	загрязнения до мойки, ($M_2-M_1^{усл}$)	детали после мойки, (M_3)	загрязнения после мойки, ($M_3-M_1^{усл}$)	удаленного загрязнения, (M_2-M_3)	детали	средняя по трем деталям
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
по базовой технологии									
5	№1	18325,33	18336,42	11,09	18327,26	1,93	9,16	82,6	82,3
	№2	3551,17	3555,92	4,75	3552,01	0,84	3,91	82,4	
	№3	4125,45	4130,45	5,00	4126,36	0,91	4,10	81,9	
10	№1	18325,33	18334,86	9,53	18327,09	1,76	7,77	81,5	81,7
	№2	3551,17	3556,57	5,40	3552,16	0,99	4,41	81,7	
	№3	4125,45	4131,49	6,04	4126,54	1,09	4,95	82,0	
15	№1	18325,33	18336,25	10,92	18327,21	1,88	9,04	82,8	82,4
	№2	3551,17	3555,88	4,71	3551,99	0,82	3,89	82,5	
	№3	4125,45	4130,94	5,49	4126,44	0,99	4,50	81,9	
20	№1	18325,33	18335,55	10,22	18327,23	1,90	8,32	81,4	81,2
	№2	3551,17	3556,27	5,10	3552,11	0,94	4,16	81,5	
	№3	4125,45	4131,52	6,07	4126,62	1,17	4,90	80,7	

Продолжение таблицы В.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	№1	18325,33	18336,43	11,10	18327,28	1,95	9,15	82,4	82,0
	№2	3551,17	3556,95	5,78	3552,20	1,03	4,75	82,1	
	№3	4125,45	4130,85	5,40	4126,45	1,00	4,40	81,5	
по испытываемой технологии									
5	№1	18325,33	18336,42	11,09	18326,15	0,82	10,27	92,6	92,3
	№2	3551,17	3556,53	5,36	3551,58	0,41	4,95	92,4	
	№3	4125,45	4131,67	6,22	4125,95	0,50	5,72	91,9	
10	№1	18325,33	18335,94	10,61	18326,55	1,22	9,39	88,5	88,5
	№2	3551,17	3555,97	4,80	3551,71	0,54	4,26	88,7	
	№3	4125,45	4130,62	5,17	4126,05	0,60	4,57	88,3	
15	№1	18325,33	18336,14	10,81	18326,88	1,55	9,26	85,7	85,4
	№2	3551,17	3557,24	6,07	3552,03	0,86	5,21	85,8	
	№3	4125,45	4131,33	5,88	4126,35	0,90	4,98	84,7	
20	№1	18325,33	18336,18	10,85	18327,03	1,70	9,15	84,3	84,2
	№2	3551,17	3556,26	5,09	3551,95	0,78	4,31	84,6	
	№3	4125,45	4131,34	5,89	4126,41	0,96	4,93	83,7	
25	№1	18325,33	18336,45	11,12	18327,71	2,38	8,74	78,6	78,8
	№2	3551,17	3557,25	6,08	3552,44	1,27	4,81	79,1	
	№3	4125,45	4130,96	5,51	4126,62	1,17	4,34	78,7	

Приложение С (справочное)

Внедрение результатов исследования

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО "СПК Новоселки"

Рязанская область, Рыбновский р-н, с.

Новоселки

Зюба И.В.

« 30 » декабря 2025 года



внедрения результатов диссертационной работы Казарина Александра Сергеевича на тему: «Совершенствование мойки деталей машин агропромышленного комплекса» в ООО "СПК Новоселки" (Рязанская область, Рыбновский р-н, с. Новоселки)

Комиссия в составе: представителя общества с ограниченной ответственностью "СПК Новоселки" - генерального директора Зюбы Ивана Валентиновича и представителей ФГБОУ ВО РГАТУ – профессора кафедры технической эксплуатации транспорта, доктора технических наук, профессора Фадеева Ивана Васильевича, соискателя кафедры Казарина Александра Сергеевича, составила настоящий акт о том, что использование предложенной автором ресурсосберегающей мойки с системой рециркуляции и регенерации растворов позволило организовать до 25 циклов использования моющего раствора, обеспечило повышение степени очистки деталей на 3,9%, сокращение времени цикла мойки на 25,0%, снижение расхода воды на 95,4%, моющих средств – на 99,6%, тепловой энергии – на 54,2%, электроэнергии – на 62,1%. Установлен значительный экологический эффект от внедрения технологии, включающий полное исключение сброса сточных вод, сокращение объема токсичных отходов на 96,1% и улучшение санитарно-гигиенических условий труда работников в ремонтной мастерской, что положительно повлияло на повышение качества ремонта, надежности и ресурса отремонтированной техники, а также сокращение материальных и трудовых затрат в ремонтном производстве.



Подписи:

Генеральный директор ООО " СПК Новоселки "

Зюба И.В.

Профессор кафедры технической
эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО РГАТУ,

д.т.н., профессор

Фадеев И.В.

соискатель кафедры технической

эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО РГАТУ

Казарин А.С.