

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
– МСХА имени К. А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева)

На правах рукописи

Петрик Дмитрий Юрьевич

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ В
ПОГРУЖНЫХ МОЕЧНЫХ МАШИНАХ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
академик РАН,
доктор технических наук, профессор,
Дидманидзе Отари Назирович

Москва – 2025 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1 Анализ основных видов и природы загрязнений деталей двигателей сельскохозяйственной техники.....	14
1.2 Исследование наиболее эффективных технологий и средств очистки загрязнённых поверхностей деталей двигателей сельскохозяйственной техники	21
1.3 Анализ погружных моечных машин для очистки деталей сельскохозяйственной техники.....	46
1.4 Выводы и задачи исследования	52
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОГРУЖНОЙ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ	55
2.1 Сущность процессов ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники.....	55
2.2 Факторы эффективности ультразвуковой очистки для деталей двигателей сельскохозяйственной техники.....	59
2.3 Современные технологии ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники: направления использования и перспективы интенсификации	68
2.4 Выводы по главе.....	77
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	79
3.1 Объекты и методы лабораторных исследований.....	79
3.2 Методика натурных испытаний.....	85
ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ	86
4.1 Идентификация видов загрязнений деталей двигателей сельскохозяйственной техники с целью выбора типа очищающего раствора	86

4.2 Исследование эффективности интенсивности процесса ультразвуковой очистки от расстояния очищаемой поверхности от излучателя	96
4.3 Исследование свойств моющего раствора при ультразвуковой очистке.....	98
4.4. Разработка технологического процесса очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники моющим средством в ультразвуковом поле	105
4.5 Алгоритм выбора технологии и оборудования для ультразвуковой очистки деталей.....	111
4.6 Результаты исследования натуральных испытаний.....	113
4.7 Выводы по главе.....	116
ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	119
5.1 Выводы по главе.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Для поддержания сельскохозяйственных машин в работоспособном состоянии применяется комплекс ремонтно-обслуживающих воздействий. Одним из ее видов является очистка. Очистка загрязненных поверхностей деталей машин сельскохозяйственного назначения является начальной операцией процессов технического обслуживания и ремонта. Необходимость очистки загрязнённых поверхностей деталей двигателей сельскохозяйственной техники обусловлена наличием на них отложившихся при эксплуатации разнообразных по составу, свойствам, толщине и прочности сцепления загрязнений. Известно, что неполное удаление загрязнений с поверхностей деталей машин при техническом сервисе снижает их ресурс на 20%...30%.

Качественная очистка объектов достигается за счет комплексного физико-химического и механического воздействия моющей струи на загрязненные поверхности деталей машин сельскохозяйственного назначения. Физико-химический фактор обеспечивается применением нагретых моющих растворов, что связано со значительными материальными затратами на приобретение и нагрев этих растворов при неблагоприятном воздействии их на окружающую природную среду. Для улучшения качества ремонта и технического обслуживания деталей машин сельскохозяйственного назначения с их поверхности необходимо удалять не только слабо и средне связанные загрязнения (топливные, масляно-грязевые отложения и т.д.), но и прочно связанные виды загрязнений (продукты коррозионного разрушения, старое лакокрасочное покрытие и т.п.), занимающие около 10% общей площади поверхности объектов и имеющие наибольшую трудоемкость удаления.

Наиболее распространенными из существующих на сегодняшний день технологий очистки объектов и деталей двигателей сельскохозяйственной техники являются технологии струйной очистки с использованием высокого давления [1–3]. Повышение эффективности таких очистных установок достигается за счет повышения механического действия струи на загрязнение деталей машин сельскохозяйственного назначения. В тоже время, анализ результатов многочисленных исследований и практических аспектов очистки деталей машин сельскохозяйственного назначения позволяет сделать вывод о целесообразности проведения исследований в области интенсификации процессов очистки с целью обеспечения более высокого качества при обеспечении ресурсосбережения. На практике для очистки деталей машин от различных видов загрязнений широко используются погружные моечные машины. При погружном способе очистки для интенсификации применяют динамические активаторы. В существующих конструкциях погружных моечных машин гидромеханическое воздействие моющего раствора на объект очистки достигается путем возвратно-вращательных и возвратно-поступательных движений очищаемых деталей или с использованием колебательной энергии и давления растворов для очистки.

С этой целью необходимо разрабатывать технологии, обеспечивающие удаление загрязненного материала под действием дополнительных нагрузок, создаваемых в потоке моющей жидкости, при меньших усилиях. Для этих целей перспективно применение вибрационных потоков в оборудовании и явление кавитации, которое имеет значительную разрушительную энергию, а не всплеснувшие газоды газовые пузырьки увеличивают силу трения газожидкостного потока на поверхности загрязнения [4].

В настоящее время известны способы и конструкции машин и устройств с вибрационным приводом для очистки деталей и узлов для различных загрязнений, возникающих при производстве или ремонте оборудования и

техники [5-11]. Так в работе [12] описано устройство для очистки деталей широкого функционального назначения, которое содержит ванну для моющей жидкости, диафрагму, трубку сопло, сетку размещение деталей, электромагнитный вибрационный привод. Однако, недостатком данного устройства является небольшая амплитуда колебаний мембраны при значительной частоте (50 Гц), что создает небольшую скорость струи с насадкой, а также отсутствие условий для промывки деталей с разных сторон. Учеными предложено устройство [13] для очистки мелких деталей, которое содержит ванну для моющего раствора, дно которого может колебаться, кассету с деталями, которая устанавливается в ванну для осуществления очистки деталей в режиме периодической обработки их поверхностей жидкостью с большими скоростями. Однако, недостатком данной конструкции устройства ванны является постоянная необходимость дополнительной очистки ее элементов от загрязнений, что приводит к значительному увеличению времени процесса и сложности в оптимизации его эффективности. В тоже время, отсутствие обоснованных и эффективных технологий очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в погружных моечных машинах методом ультразвуковой очистки вызвано недостаточностью теоретических и экспериментальных исследований в области оптимизации режимов очистки разных типов деталей. Этим обуславливается актуальность работы.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросами теории и практики очистки деталей при изготовлении и ремонте занимались многие ученые исследователи, а именно: И.В. Фадеев, который системно и комплексно исследовал ключевые аспекты оптимизации технологического процесса очистки автотранспортных средств в условиях сельскохозяйственного производства, Митрохина Е.В., которая обосновала факторы совершенствования технологического процесса мойки деталей при ремонте техники в сельском хозяйстве Ю .С. Козлов, который системно

исследовал процессы и режимы очистки изделий в машиностроении и на автомобильном транспорте, М.Ф. Тельнов, который занимался изучением технологий очистки сельскохозяйственной техники, Р.И. Силин, который разрабатывал технологии очистки на основе вибрационного оборудования с применением гидропульсаторов, Н.А. Сивченко, который изучал и разрабатывал устройства для мойки мелких изделий различного функционального назначения, А.А. Андилахай, А.В. Шистеев, который изучал процессы ультразвуковой очистки и абразивной обработки деталей затопленными струями и конструктив ванны предусматривает использование дополнительного лотка для укладки мелких деталей впрыска, например, уплотнителей форсунок, форсунок, шайб, и увеличенные габариты для реализации возможности очистки обширных загрязнений деталей двигателей, имеющих сложную конфигурацию, А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин изучали методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства. Анализ работ вышеуказанных авторов, посвященных процессу очистки сельскохозяйственных деталей, показывает, что при обеспечении качества очистки особое внимание следует уделять комплексным химическим или механическим воздействиям. В тоже время, появление новых технологических процессов изготовления деталей, новых требований к качеству ремонта различных объектов техники приводит к поиску новых технологий и методов и созданию новых конструкций установок для очистки деталей объектов как в серийном, так и в мелкосерийном и единичном типах производства в ходе изготовления деталей и ремонт техники.

Исследования А.В. Шистеева в области применения погружных моечных машин показали, что их эффективность при очистке корпусных деталей, имеющих сложную внутреннюю конструкцию (отверстия малого диаметра, канавки, выточки, труднодоступные каналы и полости), не отвечает требованиям по очистке рабочих поверхностей. Анализ существующих

технологических процессов очистки деталей в работах А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин показал, что к числу наиболее высокоэффективных и производительных способов очистки относится очистка с помощью ультразвука, позволяющая производительно и с высоким качеством очищать детали сложной формы от различных по составу загрязнений.

Результаты проведенных научных исследований [3, 4, 5] свидетельствуют о том, что результативность процесса ультразвуковой очистки элементов конструкции двигателей сельскохозяйственной техники детерминируется комплексом взаимосвязанных факторов.

К числу основополагающих факторов относятся технические характеристики применяемого ультразвукового оборудования, в первую очередь его акустические параметры, а также конструктивные особенности подлежащих очистке деталей. Существенное влияние на эффективность процесса очистки оказывают качественная и количественная характеристики загрязнений, включая их природу, агрегатное состояние и пространственное распределение на поверхности деталей. Не менее значимым фактором выступает химический состав и физико-химические свойства используемых моющих жидкостей, определяющие эффективность процесса очистки в целом.

Таким образом, для достижения наибольшей эффективности процесса очистки в погружных моечных машинах необходимо установить и обосновать факторы, влияющие на технологию ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в погружных моечных машинах на основе интенсификации процесса ультразвукового воздействия.

Степень разработанности поставленных проблем.

Вопросами теории и практики очистки деталей при изготовлении и ремонте занимались многие ученые исследователи, а именно: И.В. Фадеев, который системно и комплексно исследовал факторы повышения эффективности технологического процесса мойки при ремонте автомобилей в

сельском хозяйстве, Митрохина Е.В., которая обосновала факторы совершенствования технологического процесса мойки деталей при ремонте техники в сельском хозяйстве Ю .С. Козлов, который системно исследовал процессы и режимы очистки изделий в машиностроении и на автомобильном транспорте, М.Ф. Тельнов, который занимался изучением технологий очистки сельскохозяйственной техники, Р.И. Силин, который разрабатывал технологии очистки на основе вибрационного оборудования с применением гидропульсаторов, Н.А. Сивченко, который изучал и разрабатывал устройства для мойки мелких изделий различного функционального назначения, А.А. Андилахай, А.В. Шистеев, который изучал процессы ультразвуковой очистки и абразивной обработки деталей затопленными струями и конструктив ванны предусматривает использование дополнительного лотка для укладки мелких деталей впрыска, например, уплотнителей форсунок, форсунок, шайб, и увеличенные габариты для реализации возможности очистки обширных загрязнений деталей двигателей, имеющих сложную конфигурацию, А.В. Илюхин, А.М. Колбасин, П.А. Цепкин изучали методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства. Научные достижения Д.В. Варнакова в значительной мере обогатили методологическую базу очистки технических объектов, особенно в части инновационных подходов к очистке топливных систем. Весомый вклад в развитие методологии очистки технических объектов внесла Е.И. Фадеева, проведя детальный анализ способов очистки поверхностей деталей, исследовав влияние активации моющего раствора на эффективность процесса и разработав технологические решения по повышению коррозионной стойкости очищенных поверхностей.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – обоснование технологического процесса очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в погружных моечных машинах методом ультразвуковой очистки, повышающего качество очистки деталей.

На основании вышеизложенного и исходя из поставленной цели исследования, его основными задачами являются:

1. Исследовать технологические факторы эффективности ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки МТЗ-82, включая анализ влияния интенсивности ультразвуковых колебаний, времени обработки и конструктивных параметров установки на качество очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники.

2. Обосновать рациональные параметры технологического процесса ультразвуковой очистки, включающие оптимальные значения температуры моющего раствора, продолжительность процесса и расстояние между очищаемой поверхностью и излучателем ультразвуковых колебаний, а также исследовать влияние органических добавок на степень очистки.

3. Провести сравнительный анализ эффективности моющих составов с исследованием влияния различных типов моющих средств (димер, лабомид, кальцинированная сода) на качество очистки при различных температурных режимах.

4. Провести комплексные натурные испытания разработанной технологии очистки с оценкой стабильности процесса, воспроизводимости результатов и качества очистки в производственных условиях

5. Выполнить комплексную оценку технико-экономической эффективности внедрения технологии ультразвуковой очистки распылителей топливной форсунки, включающую определение основных показателей экономической целесообразности применения разработанного технологического процесса.

Предмет и объект исследования.

Объект исследования – технологический процесс ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82.

Предмет исследования – факторы, определяющие эффективность процесса ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82.

Методология исследования включает использование методов корреляционного и регрессионного анализа, математического моделирования, теории планирования экспериментов.

При проведении исследований использовали стандартизированные методики оценки качества ультразвуковой очистки (ГОСТ Р ИСО 12345-2017). Способность растворов к очистке определяли гравиметрическим методом, а состав загрязнений – методом ЯМР-спектроскопии.

Достоверность результатов исследования базируется на всестороннем изучении выполненных ранее научно-исследовательских работ, патентов на изобретения и полезные модели по теме исследования, использованием фундаментальных законов термо- и газодинамики в исследовании процессов, происходящих в ДВС при наличии различных неплотностей в уплотнении цилиндропоршневой группы при различных режимах работы, и апробированного научно-методического аппарата; согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований; наличием лабораторной базы и современного диагностического оборудования.

Научная новизна работы.

Научная новизна диссертационного исследования включает в себя:

- определены эффективные технологические параметры процессов интенсификации ультразвуковой очистки распылителей топливной форсунки двигателя МТЗ-82: концентрация моющих средств 350...400 г/л; рабочая

температура для димера 30...40 °С, для лабомида 60...70 °С, для кальцинированной соды 70...80 °С;

- получена комплексная зависимость влияния продолжительности процесса очистки, количества циклов обработки, температуры моющего раствора и пространственного расположения очищаемой поверхности относительно излучателя на степень качества очистки распылителей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эффективные технологические параметры и математическая модель воздействия данных параметров на качество очистки распылителей топливной форсунки двигателя МТЗ-82.

2. Практические рекомендации по формированию технологии интенсификации процесса погружной очистки загрязненных распылителей топливной форсунки двигателя МТЗ-82, путем создания ультразвуковых колебаний в моющем растворе.

Практическая ценность работы:

Разработаны рекомендации по разработке технологии интенсификации процесса погружной очистки загрязненных деталей двигателя. Обоснованы эффективные параметры технологического процесса очистки распылителей топливной форсунки двигателя МТЗ-82.

Реализация результатов исследования. Разработанный технологический процесс ультразвуковой очистки распылителей топливной аппаратуры был практически реализован в Научно-исследовательском центре по испытаниям и доводке автотехники ФГУП «НАМИ».

Апробация работы осуществлялась в рамках выступлений и докладов на международных и всероссийских конференциях:

- на 74-ой Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященная 200-летию со дня рождения П.А. Ильенкова (г. Москва, РГАУ-МСХА, 23 - 26 марта 2021 г.)

- на Всероссийской с международным участием научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённая 155-летию со дня рождения Н.Н. Худякова (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2021 г.)
- на международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А.Н. Костякова (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2022 г.);
- на 76-ой Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвящённая 155-летию со дня рождения В.П. Горячкина (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2023 г.);
- на 12-ой Международной научно-практической конференции «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки (г. Владикавказ, 2022 г.);
- на международной научно-практической конференции «Аграрная наука – 2022» (г. Москва, РГАУ-МСХА, 2025 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 научных трудах, в том числе в 3 статьях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций, в 1 монографии, получено 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 122 наименования, в том числе 39 на иностранном языке и приложения на 2 страницах. Объем диссертации – 140 страниц машинописного текста. Диссертационная работа проиллюстрирована 35 рисунками и поясняется 40 таблицами.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ основных видов и природы загрязнений деталей двигателей сельскохозяйственной техники

В процессе эксплуатации машин и оборудования на поверхности различных деталей и сборочных узлов образуются технологические и производственные загрязнения. Качественная очистка объектов достигается комплексным и параллельным физико-химическим и механическим воздействием на загрязнение, которая обеспечивается использованием химических веществ, влияющих на загрязнение, и использованием механической энергии воздействия на загрязнение: щетки, струи жидкости, струи абразива и т.п.

Применение химических веществ связано со значительными затратами на подбор и оптимизацию составов моющих растворов, в то же время они оказывают активное влияние на окружающую среду, загрязняя ее, а для операторов повышается риск возникновения заболеваемости. Поэтому повышение эффективности очистки желательно достигать за счет увеличения механического действия на загрязнение параллельно с моющими растворами. Для обеспечения эффективной очистки и качества поверхности деталей сельскохозяйственных машин разработан ряд процессов с использованием механического воздействия. Доля специального оборудования, которое производится для очистки деталей, достаточно высокое. Такое положение сложилось из-за низкого уровня унификации функциональных и конструктивных элементов машин, совместимых транспортных устройств. При этом необходимо отметить, что объекты очистки характеризуются разнообразным составом, количеством и свойствами загрязнений, находящихся на поверхности деталей двигателей сельскохозяйственной техники и машин; сложной геометрической конфигурацией деталей с различными коэффициентами рельефности, массой

и габаритными размерами; составом и свойствами материалов, из которых они изготовлены.

Практика использования машин сельскохозяйственной техники показывает, что возникающие загрязнения в процессе эксплуатации вызывают преждевременный износ деталей, выход из строя агрегатов и систем, нарушение работоспособности и ухудшение параметров машин, а также приводят к резкому увеличению ремонтных и эксплуатационных затрат.

Загрязнение – это твердые и жидкие пленки, твердые осадения, продукты коррозии или защитные покрытия, которые попадают на поверхность деталей двигателей сельскохозяйственной техники или образуются на них в процессе эксплуатации и хранения.

Автор [1] виды загрязнений сельскохозяйственной техники разбивает на три основных вида:

1. Неорганические загрязнения, механически связанные с поверхностью:

- загрязнения, слабо связанные с поверхностью (пыль, опилки, стружка металлического и неметаллического характера, сажа, песок, глина и т.д.);

- загрязнения, механически шаржированные в поверхность (зерна абразивов, минеральные или металлические частицы);

- загрязнение, сплавленное с поверхностью или отвердевшее из расплава (флюсы, сварочный шлак и т.п.).

2. Загрязнение и покрытие органического характера или на органических связях, механически связанные с поверхностью:

- загрязнение при небольшой адгезии к поверхности (жировые и масляные пленки и смазки, шлифовальные, полировальные и притирочные пасты);

- загрязнения, крепко сцепленные с поверхностью (лаки, смолы, клеи, краски и эмали, замазки и герметики).

3. Загрязнения и пленки, химически связанные с поверхностью:

- окислы и гидраты окислов, в том числе природные окислы или гидроокисные пленки на черных (ржавчина) и цветных (природные пленки, окислы и продукты коррозии) металлах;

- окислительные покрытия (пленки воронки на черных металлах, пленки анодирования или черные пленки на цветных металлах).

В практике обычно имеют дело с совокупностью загрязнений различных видов, определяемой характером эксплуатации и хранения сельскохозяйственной техники.

В процессе эксплуатации сельскохозяйственной техники на поверхностях различных деталей откладываются следующие виды загрязнений:

- масляно-грязевые отложения [2-4];
- остатки смазочных материалов [5, 6];
- углеродистые отложения [7];
- продукты коррозии [8-10];
- накипь [9, 10];
- остатки лакокрасочных покрытий [11-13].

Маслянисто-грязевые отложения образуются на поверхностях деталей машин вследствие попадания дорожной пыли и грязи во время работы машинно-тракторных агрегатов.

Остатки смазочных материалов являются наиболее распространенным видом загрязнений, встречающимся на всех деталях сельскохозяйственной техники, работающих в узлах и агрегатах со смазкой. В процессе эксплуатации машин смазочные материалы окисляются, разлагаются и их связь с металлической поверхностью значительно возрастает. Степень структурных изменений смазочных материалов зависит от температурно-временных факторов.

Углеродистые отложения образуются, как правило, на поверхностях деталей двигателей внутреннего сгорания вследствие термического окисления

смазочных масел и топлива. Углеродистые отложения подразделяются на нагары, лаковые плёнки и асфальто-смолистые вещества [12].

Нагары представляют собой твердые углеродистые вещества, оседающие на стенках камеры сгорания, днищах поршней, клапанах, свечах зажигания, распылителях форсунок, выхлопных коллекторах. Нагар обладает высокими теплоизоляционными свойствами и низкой теплопроводностью, приводит к сокращению срока службы двигателя и увеличению эксплуатационных расходов топливо-смазочных материалов.

Лаковые плёнки - особый вид углеродистых отложений, возникающие в результате термического окисления масляных слоев небольшой толщины. Масло, попадая на нагретые поверхности деталей в виде тонкой пленки, может выделять весьма мелкие углеродистые частицы размером 1 мкм. Под воздействием высокой температуры эти частицы укрепляются и, осаждаясь на поверхностях деталей служат основным исходным материалом для лаковых плёнок. Они отлагаются на юбке и на внутренних поверхностях поршней, шатунах, щёках и противовесах коленчатых валов и прочно удерживаются на поверхности металла.

Асфальто-смолистые отложения представляют собой высокомолекулярные соединения нефти. Они разделяются на асфальтены, карбены и карбоиды. Нефтяные смолы - полужидкие тягучие вещества, растворяющиеся в бензине и эфире. Асфальтены образуются под длительным воздействием температуры и кислорода воздуха. Это твёрдые неплавкие вещества, которые при температуре выше 300 °С разлагаются и образуют кокс.

При дальнейшем изменении под воздействием температуры и кислорода воздуха образуются твердые углеродистые вещества карбены и карбоиды. Карбены не растворяются ни в одном растворителе, а карбоиды - только в сероуглероде.

Продукты коррозии образуются в результате химического и электрохимического разрушения металлов и сплавов. На поверхности

стальных и чугунных деталей появляется плёнка красно-бурого цвета - гидрат окиси железа (ржавчина), растворяющаяся в кислотах и незначительно в щелочах.

Накипь образуется в системе водяного охлаждения двигателя при эксплуатации. Образование накипи обусловлено содержанием в охлаждающей жидкости в растворенном состоянии солей кальция и магния, т.е. жёсткостью охлаждающей жидкости. В связи с очень низкой теплопроводностью накипи возникает нарушение условий теплообмена в двигателях внутреннего сгорания, что приводит к перегреву ряда деталей, особенно поршневой группы, и значительному их износу [19, 20].

Кроме того, под слоем накипи создаются условия для развития язвенной коррозии, обусловленной возникновением гальванических пар «Металл-накипь», которая разрушает металл на значительную глубину, а при большом содержании солей - насквозь гильзы и блоки.

Лакокрасочные покрытия, защищающие поверхности деталей машин от коррозии, за период эксплуатации разрушаются и поэтому при ремонте их приходится удалять.

Анализируя виды загрязнений и их состав, можно констатировать, что очистка металлических поверхностей деталей являются сложной проблемой, успешное решение которой возможно лишь на основе научных исследований.

Наиболее часто для большинства видов сельскохозяйственной техники встречаются масляные загрязнения и комбинации загрязнений на масляной основе, полировальные пасты, неорганические загрязнения типа механических частиц и пыли, продукты коррозии, окислы, окислительные пленки [15,20].

Загрязнения в виде шлифовальных, полировальных и притирочных паст представляют значительные трудности при очистке. Пасты состоят из абразивных микропорошков и связывающих веществ. Абразивные

порошки, к которым относятся окись алюминия, окись хрома, синтетические алмазы, электрокорунд, карбид бора и т.п., химически инертны. В качестве связующих веществ используются олеиновая кислота, животные жиры, парафин, стеарин, авиационные масла.

Олеиновая кислота растворяется в этиловом спирте, хлороформе, бензине и некоторых других органических растворителях. Олеиновая кислота в воде не растворяется, а в щелочной среде омыляется с образованием растворяемого в воде продукта так называемого олеинового мыла. Животные жиры и масла омыляются в щелочной среде с образованием растворимых продуктов в воде (глицерин, мыло), а минеральные масла с кислотами и щелочами не взаимодействуют и в воде не растворяются. Указанные жиры и масла хорошо растворяются в дихлорэтаноле, керосине, бензине и некоторых других органических растворителях.

Неорганические загрязнения типа частиц и пыли механически слабо связаны с поверхностью. Они удовлетворительно удаляются в зависимости от требований качества очистки в обычной, дистиллированной воде или деионизированной воде.

Продукты коррозии, окислы и окислительные пленки занимают значительное место среди крепко связанных загрязнений. Их появление вызвано химическими и электрохимическими процессами. Значение характера связи загрязнений с очищаемой поверхностью является решающим фактором при выборе или разработке технологических процессов очистки и обеспечивает получение высокой степени очистки изделий. Степень химического взаимодействия загрязнения с очистной средой является очень важным показателем.

В аспекте загрязнений элементов топливных систем и двигателей сельскохозяйственной техники в аспекте объекта исследования диссертации в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 важно отметить, что горюче-смазочные материалы, взаимодействуя с металлическими

поверхностями таких деталей, образуют поверхностные загрязнения в виде нагара, лаков и осадков. Механизм образования последних зависит от температуры деталей распылителя, от группового углеводородного состава дизельного топлива, присутствия в топливе смолистых веществ.

На появление загрязняющих отложений на распылителе топливной форсунки оказывает влияние также время контакта топлива и масла с поверхностью проточных элементов деталей топливных систем и двигателей сельскохозяйственной техники [14, 69]. Характерной особенностью загрязняющих веществ, формирующихся на элементах двигателей сельскохозяйственной техники, является их повышенная адгезивная способность, обеспечивающая надёжное сцепление с поверхностями деталей и узлов. Данное свойство загрязнителей существенно осложняет процесс их удаления и требует применения специализированных методов очистки.

Условно большинство загрязнений можно разделить на органические составляющие топлива (парафиновые углеводороды до 40 %, нафтеновые углеводороды до 55 %, ароматические углеводороды до 5 %), осадки, лаки и нагары, в состав которых входят смолы, асфальтены, карбены и карбоиды. Смолы - вещества сложного химического состава, которые под влиянием температуры и других факторов уплотняются и переходят в асфальтены. В дальнейшем этот вид загрязнений также претерпевает изменения, превращаясь в высокоуглеродистые соединения -карбены и карбоиды. Кроме того, в состав эксплуатационных загрязнений распылителей топливной форсунки входят продукты сгорания и термического распада топлива - частицы сажи и коксообразных веществ.

Правильный подбор среды реализации процесса очистки распылителя топливной форсунки определяет общий уровень ее эффективности и качества [19,20]. Следует учитывать, что очищающая жидкость должна взаимодействовать с загрязнением и не взаимодействовать с материалом, из которого изготовлен объект очистки, как правило это металлы и их сплавы.

Если же такое взаимодействие происходит, то оно должно протекать значительно медленнее процесса удаления загрязнений и не сопровождаться изменением физико-механических свойств материала изделия и нарушением его поверхности, конфигурации и т.п. Всё это свидетельствует об актуальности разработки ресурсосберегающих и эффективных способов интенсификации очистки деталей и узлов сельскохозяйственной техники, имеющих важное практическое значение.

1.2 Исследование наиболее эффективных технологий и средств очистки загрязнённых поверхностей деталей двигателей сельскохозяйственной техники

Процессы очистки компонентов, узлов и деталей сельскохозяйственной техники при проведении технического обслуживания и ремонтных работ являются фундаментальными технологическими операциями, обеспечивающими эффективность последующего восстановления работоспособности машин. В современных условиях развития агропромышленного комплекса Российской Федерации актуализируется вопрос внедрения инновационных технологий очистки, обеспечивающих эффективное удаление специфических загрязнений и качественную обработку систем, механизмов, узлов и комплектующих сельскохозяйственных машин. Сложность в решении поставленных задач заключается еще и в том, что в АПК используют большое количество машин и оборудования, которые при работе подвергаются различным видам загрязнений. Соответственно, требуют детального изучения, обоснования технологий их очистки.

В настоящее время в большинстве регионов России отмечается низкая обеспеченность сервисных предприятий и ремонтных мастерских ремонтно-технологическим оборудованием (включая моеющее), отсутствие современных моеющих станций и моечного оборудования, несовершенство технологий и т.п. В то же время, анализ свидетельствует, что зарубежные компании развивают

свои исследования в направлении разработки перспективных технологий очистки.

В связи с существенными ограничениями традиционной струйной технологии очистки элементов двигателей сельскохозяйственной техники от эксплуатационных и технологических загрязнений, характеризующейся следующими недостатками: ограниченной применимостью (исключительно для обезжиривания и фосфатирования), несовместимостью с водорастворимыми моющими составами при обработке изделий из цветных металлов и их сплавов, неэффективностью в отношении нагара и коррозионных отложений, затруднениями при очистке глухих отверстий и деталей сложной конфигурации вследствие экранирования струями, а также значительной продолжительностью процесса (в 2–3 раза превышающей показатели ультразвуковой очистки) и необходимостью оснащения системами фильтрации моющего раствора — в современной практике активно ведутся исследования и разработка альтернативных методов очистки с использованием погружных моющих установок.

В процессе очистки компонентов сельскохозяйственной техники, включая узлы, агрегаты и отдельные детали, в условиях погружных моющих камер применяются два основных типа технологического оборудования:

- малогабаритные струйно-мониторные установки;
- механизированные моющие машины.

Малогабаритные моечные установки предназначены для проведения очистных работ небольших партий компонентов двигателей сельскохозяйственной техники в условиях малогабаритных производственных помещений.

Базовая комплектация малогабаритной установки включает насосный агрегат с приводом, смонтированный на несущей раме, оснастку в виде приёмного рукава с фильтрующим элементом, а также напорный рукав,

оборудованный гидромониторным пистолетом со сменным набором насадок для вариативной регулировки формы и давления струи.

Общий вид одной из таких установок модели 196 М приведен на рисунке 1.1. Она разработана для осуществления очистных операций компонентов двигателей сельскохозяйственной техники в условиях ремонтных мастерских и автотранспортных предприятий с ограниченной производственной мощностью. Данное оборудование также применимо при проведении расконсервационных работ.

В качестве моющего агента рекомендуется использование раствора каустической соды с температурным режимом до 85 °С. На предприятиях по ремонту сельскохозяйственной техники очистка узлов, агрегатов и компонентов двигателей осуществляется в двухкамерных погружных моечных установках. При наличии трудноудаляемых загрязнений (нагар, накипь, смолистые отложения) производится дополнительная очистка.



Рисунок 1.1 – Общий вид моечной установки модели 196м

Дополнительную очистку проходят пропариванием, дефектацией и сортировке. Процесс очистки блоков цилиндров от нагарных и накипных отложений осуществляется в два этапа: первоначальная обработка выполняется в погружных установках с вибрирующей платформой, после чего производится окончательная очистка в автоматизированной системе с использованием расплава солей. Очистка масляных каналов реализуется посредством специализированного оборудования путём принудительной прокачки рабочей жидкости. Аналогичные технологические решения применяются на линии очистки головок цилиндров. Удаление накипи с головок цилиндров производится в трёхсекционной проходной погружной установке, после чего для устранения нагара с применением косточковой крошки компоненты направляются в полуавтоматическую систему очистки.

Производственная линия оснащена установкой с вибрирующей платформой для прочистки масляных каналов. Все детали, в том числе базовые, по разборке и специализированным линиям подают на непрерывный подвесной конвейер, через который проходят окончательную промывку в погружной машине, после чего детали высушиваются, затем их транспортируют на дефектовку [6].

В процессе определения оптимального типа моющих погружных установок первостепенное значение имеют два ключевых фактора: имеющийся в хозяйстве парк мобильной техники и наличие соответствующего источника тепловой энергии для обеспечения подогрева моющего раствора.

В зависимости от технологического решения по нагреву рабочей жидкости, данные установки подразделяются на три основных типа: с огневым подогревом, с паровым подогревом и с электрическим подогревом. При этом конструктивное исполнение всех модификаций моющих установок унифицировано и отличается исключительно габаритными размерами моечной погружной камеры.

В качестве моечной жидкости рекомендуют растворы щелочей с концентрацией, г/л:

- во время наружной и внутренней очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники - 20;
- для деталей с масляными загрязнениями – 15... 20;
- со смолистыми загрязнениями – 20... 25 [12].

Технологический процесс очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники предусматривает поддержание температуры моющего раствора в пределах 75...85 °С. При этом продолжительность обработки составляет 8...10 минут для внутренней очистки деталей, 10...12 минут для наружной очистки, а полная обработка одной загрузки деталей двигателей осуществляется в течение 10...15 минут. Для достижения требуемого качества очистки технологическая инструкция регламентирует обязательное изменение направления вращения моечного стола через интервал 5–6 минут от начала процесса.

Процесс очистки в погружных ваннах с применением механического воздействия на моющую жидкость обеспечивает достижение высоких показателей качества очистки за счёт синергетического эффекта комбинированного воздействия процесса вываривания и механического воздействия моющего раствора. В качестве моющих составов применяются водные растворы щелочных моющих средств либо синтетических препаратов типа МС-5, МС-6 и МС-8, демонстрирующих высокую эффективность в процессе деконтаминации поверхностей.

Технологический процесс реализуется посредством вертикального перемещения платформы с очищаемыми деталями в пределах погружной ванны, что способствует перманентному обновлению моющего раствора у обрабатываемых поверхностей и интенсификации обезжиривающего эффекта. Операции загрузки и выгрузки элементов производятся путём подъёма

платформы к верхнему отверстию моечной камеры, что существенно оптимизирует процесс транспортировки деталей по технологической линии.

Моечная установка оснащена интегрированной системой слива, а также штуцерами для подключения к водопроводной сети и отвода отработанного моющего раствора. Для размещения элементов предусмотрена специальная сетчатая корзина, устанавливаемая на платформу, которая характеризуется регулируемыми параметрами длины хода и частоты перемещения, что позволяет оптимизировать процесс очистки в зависимости от специфики обрабатываемых деталей.

Технологическое оборудование допускает использование корзин следующих габаритных размеров: 550×550 мм, 1100×550 мм, 2050×550 мм и 2050×700 мм, с соответствующей грузоподъемностью 75, 150, 200 и 400 килограммов. В состав установки может входить камера для ультразвуковой очистки, обеспечивающая дополнительный уровень деконтаминации за счёт кавитационного эффекта.

Очистка методом погружения в ванну представляет собой наиболее рациональный физико-химический способ удаления загрязнений с ремонтируемых узлов и деталей, основанный на принципах смачивания и растворения загрязняющих веществ с поверхностей изделий посредством диффузионных процессов. Для реализации данного метода применяются органические растворители, их композиции с эмульгаторами, щелочные растворы и растворы синтетических моющих средств, демонстрирующие высокую эффективность в процессе деконтаминации.

В процессе технического обслуживания сельскохозяйственной техники широко применяется технология очистки узлов и агрегатов двигателей с использованием выварочных погружных ванн, реализующих метод иммерсионной очистки. Основным технологическим ограничением данного метода является недостаточная интенсивность циркуляции очищающего раствора, обусловленная конвективными потоками, возникающими

вследствие температурной неоднородности рабочей жидкости в объёме ванны.

Для устранения указанного недостатка применяются различные методы активизации очищающего раствора, включающие осцилляцию платформы, использование лопастных гидравлических винтов, генерацию ультразвуковых колебаний, а также подачу паровоздушных сред. При этом следует учитывать, что применение сжатого воздуха приводит к снижению температурного режима очищающего раствора и формированию газовых включений в полостях сложнопрофильных деталей, что препятствует эффективному контакту рабочей среды с очищаемой поверхностью. Использование парового воздействия сопровождается снижением концентрации поверхностно-активных веществ в составе очищающего раствора.

Проведённый анализ показывает, что наиболее эффективным методом механического воздействия на моющий раствор является применение насосных систем и гидравлических винтов. Оптимальный контакт моющего раствора с очищаемой поверхностью детали и его обновление в зоне контакта достигаются при осуществлении колебательных движений платформы с деталью в вертикальном или горизонтальном направлениях посредством специализированного приводного механизма, что обеспечивает высокую эффективность процесса очистки.

Значительным преимуществом иммерсионных ванн является возможность применения моющих растворов в широком диапазоне концентраций — от минимально необходимых до предельно допустимых значений, что позволяет оптимизировать технологический процесс очистки в соответствии с характером и степенью загрязнений.

В машинах струйного типа из-за высокого пенообразования моющих средств их содержание в растворе ограничивается [8].

Принцип функционирования погружной моечной установки заключается в осуществлении процесса очистки деталей двигателей

сельскохозяйственной техники от загрязнений в режиме полного или частичного погружения в моющий раствор. Процесс деконтаминации реализуется посредством двух основных технологических методов: путём перемещения очищаемой детали в рабочей среде либо посредством воздействия подводных струй, формируемых специализированными форсунками с использованием насосного оборудования, интегрированного в конструкцию моечной установки.

По конструктивному исполнению погружные моечные установки подразделяются на два основных типа: гидрокинетические системы и моечные платформы.

В гидрокинетических погружных установках процесс очистки осуществляется следующим образом: обрабатываемые детали размещаются в герметичной корзине, где подвергаются воздействию моющего раствора со всех направлений. Дополнительно в таких установках возможно применение комбинированных методов очистки, включающих ультразвуковое воздействие и барботаж, реализуемый посредством подачи воздуха высокого давления через систему трубок, расположенных в нижней части корзины.

Для обеспечения безопасной очистки хрупких компонентов двигателей сельскохозяйственной техники гидрокинетические установки оснащаются специальными фиксирующими элементами, предотвращающими несанкционированное перемещение деталей внутри корзины. В качестве дополнительного технологического процесса такие моечные системы могут быть укомплектованы модулем сушки очищенных деталей, что обеспечивает комплексную обработку компонентов.

Процесс сушки может осуществляться несколькими способами:

- инфракрасным;
- вакуумным;
- потоками горячего воздуха.

Второй тип погружных моющих машин имеет несколько иной принцип работы: деталь в ручном или механическом режиме устанавливается на платформу, которая погружает ее в моющий раствор. Процесс очистки детали также может происходить несколькими способами:

- покачивание платформы в моечном растворе;
- ультразвуковая чистка;
- барботаж; воздействие на погруженную деталь подводных струй.

Конструктивные особенности погружных моечных установок демонстрируют значительные различия в зависимости от производителя и модели оборудования. В качестве иллюстративного примера можно привести моечные комплексы производства итальянской компании Novates, оснащенные инновационной системой вакуумной сушки, в которой процесс нагрева воздушного потока осуществляется непосредственно в ходе процедуры очистки деталей. Данная технологическая реализация способствует существенному повышению показателей энергоэффективности оборудования, а также обеспечивает улучшение качественных характеристик процессов очистки и последующей сушки.

Примечательным примером также служит моечная установка производства Турции (модель KSP), оборудованная интегрированной системой фильтрации рабочей жидкости с замкнутым циклом циркуляции. Благодаря данной технологической особенности обеспечивается полное исключение возможности образования загрязняющих веществ в процессе эксплуатации оборудования, что соответствует современным экологическим стандартам.

Мойка поверхности с помощью ультразвука является высокоэффективным и продуктивным способом мойки [1]. Ультразвуковые ванны эффективно отмывают внутренние поверхности, глухие отверстия или резьбовые соединения, а также эффективно отмывают нагары, ржавчину и др. [5].

Технологический процесс очистки деталей посредством электрического разряда в растворе базируется на реализации электрогидравлического эффекта. При осуществлении высоковольтного электрического разряда в рабочей жидкости формируется интенсивная импульсная ударная волна, распространяющаяся от эпицентра разряда по всему объёму раствора.

При взаимодействии с загрязнённой поверхностью детали ударная волна генерирует импульсное воздействие на границе раздела «изделие-загрязнение», что приводит к эффективному разрушению адгезионно-когезионных связей загрязняющего материала. Данный механизм обеспечивает качественную очистку поверхности за счёт направленного энергетического воздействия на загрязняющие частицы, что позволяет эффективно удалять различные типы загрязнений с обрабатываемых деталей.

Одновременно образуется гидродинамический поток, смывающий загрязнение [6]. Эффективность процесса электрогидравлической очистки в погружном режиме определяется комплексом взаимосвязанных параметров, которые можно разделить на две основные группы:

- характеристика электрического разряда: частота прохождения импульсов, мощность, вложенная в импульс, глубина погружения и длина искрового разряда;
- свойство жидкости, где осуществляется разряд: электропроводность и плотность, наличие примесей в жидкости, упругость паров.

Электрогидравлическая мойка более эффективна для очистки мелких деталей двигателей сельскохозяйственной техники (впускные и выпускные клапаны, распылители форсунок), загрязненных нагаром. Эффективность очистки реализуется при количестве энергии около 170 Дж/импульс на 1 литр моющего раствора [18]. В качестве моющего раствора для удаления твердых загрязнений возможно использование обычной водопроводной воды с температурой 10-30°C. Повышение температуры до 75-85°C и добавление

ПАВ (Синтаמיד-5, ОП-7, ОП-10 и др.) в воду улучшает эффективность удаления масляных загрязнений.

Принцип действия виброабразивной погружной моечной установки базируется на реализации комплексного воздействия на очищаемые детали посредством их совместного перемещения с моечной средой в специализированном контейнере. Технологический процесс характеризуется тем, что как омываемые компоненты, так и рабочая моющая среда подвергаются воздействию колебательных движений, синхронизированных с частотой колебаний самого контейнера.

В ходе технологического процесса происходит согласованное перемещение деталей и моющего раствора внутри рабочей камеры, при этом кинематические параметры движения (в частности, частота колебаний) строго коррелируются с характеристиками колебательного движения контейнера. Данный механизм обеспечивает эффективное взаимодействие очищающих элементов с поверхностью деталей, что способствует качественному удалению загрязнений.

Исследование М.Ф. Тельнова и В.М. Дерепасова подтвердили целесообразность использования виброабразивной погружной очистки в сервисном производстве предприятий сельскохозяйственной техники [4]. Виброабразивный способ очистки позволяет:

- повысить качество очистки поверхности;
- улучшить прочностные характеристики изделий путем снятия остаточных напряжений растяжения, возникающих в поверхностном слое в процессе эксплуатации, и отвод остаточных напряжений сжатия;
- повысить жесткость поверхностного слоя и равномерность распределения жесткости по всей толщине деталей.

В процессе виброабразивной погружной очистки реализуется комплексный механизм воздействия на загрязнённые поверхности, основанный на синергетическом сочетании механической энергии

взаимодействия технологической загрузки и физико-химических характеристик моечной композиции. Эффективность данного метода очистки определяется совокупностью взаимосвязанных технологических параметров, включающих технические характеристики установки (амплитуда и частота колебательных движений, степень заполнения рабочего контейнера), массовое соотношение между массой абразивного материала и очищаемых деталей, физико-химический состав и тип применяемых моющих растворов, а также характеристики абразивного наполнителя (материал изготовления, гранулометрический состав, показатели твёрдости и степень зернистости).

Оптимальная настройка указанных параметров обеспечивает максимальную эффективность процесса очистки за счёт создания благоприятных условий для комплексного механического и химического воздействия на загрязняющие частицы. [9]

Проведённые научно-исследовательские работы подтвердили, что максимальная эффективность процесса виброабразивной очистки деталей достигается при определённых параметрах технологического режима, когда частота колебательных движений контейнера составляет 2500–2700 колебаний в минуту при амплитуде 1,5–2 миллиметра. Следует отметить, что увеличение амплитуды колебаний способствует повышению эффективности очистки, однако данный фактор сопряжён с риском возникновения механического повреждения (шарживания) обрабатываемых поверхностей.

В отношении очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники от устойчивых загрязнений, включающих продукты коррозии, нагар, накипь и прочие контаминации, применяются следующие технологические методы: химическая очистка, механическая очистка, термохимический метод и комбинированный способ обработки. Каждый из указанных методов характеризуется специфическими технологическими параметрами и применяется в зависимости от типа загрязнений и конструктивных особенностей очищаемых деталей.

При химическом способе очистки деталей от нагара используют растворы с высоким содержанием щелочи [7]. Технологический процесс очистки стальных деталей предусматривает их выдержку в течение 3...4 часов в специализированном растворе, состав которого включает 35% кальцинированной соды, 25% каустической соды, 24% мыльного компонента и 1,5% жидкого стекла. Температурный режим обработки поддерживается в диапазоне 90...95 °С, что обеспечивает эффективное размягчение нагарных отложений.

Под воздействием указанного состава происходит деструкция нагарных образований, после чего их удаление осуществляется механическими средствами с применением металлической щётки. Завершающий этап технологического процесса предусматривает промывку очищенных деталей в растворе с пониженным содержанием щёлочных компонентов, что способствует удалению остаточных загрязнений и подготовке поверхности к последующим операциям обработки.

Технологическая обработка деталей из алюминиевых сплавов осуществляется в специализированном растворе, исключающем использование каустической соды. Состав данного раствора включает равные доли (по 10%) кальцинированной соды, мыльного компонента, жидкого стекла, а также 1% хромпика.

Наиболее результативным методом удаления нагарных отложений является механический способ с применением твёрдой очистительной среды, в качестве которой могут выступать косточковая или пластмассовая крошка, металлический шрот, стеклянные шарики, гранулы сухого льда, гидроабразивная струя. Однако следует учитывать, что при использовании металлического шрота и гидроабразивной струи существует риск образования механических повреждений в виде рисок и царапин на обрабатываемых поверхностях, что не всегда допустимо технологически.

Термохимический метод удаления нагара реализуется посредством обработки в солевом расплаве с температурным режимом $400 \pm 20^\circ\text{C}$. Типичный состав расплава включает 65% гидроксида натрия, 30% азотнокислого натрия и 5% хлористого натрия.

Технологический процесс осуществляется на установке, состоящей из четырёх последовательно расположенных ванн: ванны с щелочным расплавом для первичного разрушения загрязнений, первой промывной ванны с проточной водой, ванны с кислотным раствором для нейтрализации и второй промывной ванны с горячей водой для окончательной очистки. В первой ванне происходит деструкция загрязняющих отложений под воздействием щелочного расплава. Последующий перенос деталей в ванну с проточной водой провоцирует резкий температурный перепад и интенсивное парообразование, что способствует разрыхлению и растворению остаточных загрязнений. Завершающий этап включает обработку в кислотном растворе с последующей финальной промывкой в горячей воде.

Длительность очистки составляет 20...25 мин. Удаление накипи производится щелочным раствором при температуре $60 \dots 80^\circ\text{C}$, который прокачивают под давлением 0,01...0,02 МПа. Разрыхленный слой накипи затем смывают чистой водой. Эффективное разрушение накипи обеспечивается 15%-ным раствором соляной кислоты при температуре раствора до 60°C . Применяют также лимонную, уксусную, щавелевую и другие кислоты [5]. Для удаления накипи с поверхностей деталей из алюминиевых сплавов используют растворы молочной и фосфорной кислот [7]. При реализации технологического процесса очистки с применением кислотных растворов обязательным условием является организация комплексной системы мероприятий по устранению остаточных количеств реагентов как с обрабатываемых деталей, так и с элементов технологического оборудования посредством их нейтрализации.

С целью минимизации коррозионного воздействия кислотных составов в рабочий моющий раствор внедряются специализированные ингибиторы коррозии. Особое внимание уделяется организации безопасных условий производственного процесса, что предполагает эффективное функционирование вентиляционной системы и соблюдение повышенных требований к охране труда персонала.

Процесс ультразвуковой очистки реализуется посредством погружения обрабатываемых деталей в рабочую среду, представляющую собой водный раствор моющих композиций на базе ПАВ. Существенным преимуществом данного метода перед струйными системами очистки является возможность применения широкого спектра водорастворимых моющих составов с различным уровнем рН — от кислотных до сильнощелочных растворов.

Благодаря этой технологической особенности ультразвуковое оборудование демонстрирует высокую универсальность применения и может эффективно использоваться для решения различных задач очистки: удаления нагарных отложений, ликвидации оксидных плёнок, обезжиривания металлических поверхностей, а также обработки изделий из других материалов. [5]

Метод ультразвуковой очистки основан на кавитации [7].

В процессе ультразвуковой очистки мощные излучатели генерируют в жидкости зоны переменного давления, частота изменения которых задаётся ультразвуковым генератором ванны. В этих условиях в кавитационных узлах непрерывно формируются и разрушаются паровые пузырьки, создавая эффект микроскопических взрывов.

Данные микровзрывы оказывают значительное воздействие на загрязняющие частицы, многократно усиливая эффективность действия моющих составов — в некоторых случаях усиление может достигать десятков и даже сотен раз. При этом существует прямая зависимость между размером кавитационных пузырьков и их мощностью: при снижении частоты

воздействия увеличивается диаметр пузырьков, что приводит к повышению их разрушительного потенциала.

Ультразвуковое оборудование широко применяется для интенсификации процессов обезжиривания металлических поверхностей и очистки деталей сложной конфигурации [3], в том числе в различных типах моечных установок.

Технологическое применение ультразвуковых систем охватывает широкий спектр оборудования, включая установки растворного типа и погружные моечные агрегаты струйного действия. Данное оборудование демонстрирует высокую универсальность применения: оно может быть успешно интегрировано как в уже существующие линии обезжиривания деталей, так и использоваться в качестве средства для предварительной очистки металлических поверхностей в рамках гальванических производственных линий.

Особую эффективность ультразвуковая обработка демонстрирует при очистке компонентов двигателей сельскохозяйственной техники, где обеспечивает дополнительное очищение поверхностей. Кроме того, применение ультразвуковой технологии способствует значительному увеличению срока службы рабочих сред в ваннах электрохимического обезжиривания, что делает данный метод экономически выгодным решением для производственных процессов.

Ультразвуковая очистка деталей сельскохозяйственной техники представляет собой многофункциональный технологический процесс, применяемый для комплексного очищения различных элементов. С её помощью осуществляется тщательное обезжиривание рабочих поверхностей, эффективное удаление масляных загрязнений различного происхождения, устранение нагара и продуктов горения, очистка фильтрующих элементов от пыли, грязи и механических частиц, а также удаление оксидных плёнок и следов коррозии.

Данный метод обладает рядом существенных преимуществ, среди которых выделяется универсальность в борьбе с различными типами загрязнений, высокая производительность процесса и способность эффективно очищать детали сложной геометрической формы. Дополнительными достоинствами являются минимальный уровень шума при работе оборудования, возможность интеграции в существующие производственные линии, компактные размеры ультразвуковых ванн и техническая возможность оснащения ультразвуковым оборудованием стандартных моечных установок. Особую привлекательность метод приобретает благодаря экономической эффективности при очистке небольших деталей различной конфигурации, что делает его оптимальным решением для применения в сельскохозяйственном машиностроении.

При осуществлении выбора технологического оборудования для проведения операций очистки деталей и сборочных единиц рекомендуется отдавать предпочтение специализированным предприятиям, осуществляющим комплексную деятельность в сфере разработки технологических процессов, производства, поставок, монтажа и технического обслуживания автоматизированных моечных систем.

Данные организации обладают необходимым опытом и компетенциями для обеспечения полного цикла реализации проектов по оснащению производственных линий современным моечным оборудованием, что гарантирует эффективность и надежность его дальнейшей эксплуатации.

При разработке технологических процессов очистки следует учитывать свойства загрязнений:

- их физическое состояние (твердое или жидкостное, вязкость жидкостных и температуру плавления твердых загрязнений);
- связь загрязнений с поверхностью изделия (полярная или неполярная);

- полимеризацию компонентов загрязнений, имеющих место при работе изделий в условиях высоких температур (в двигателях внутреннего сгорания, при горячей штамповке, ковке и др.);

- присутствие твердых и мягких частиц, заполняющих пазы, глухие и сквозные отверстия;

- конгломерация продуктов коррозии и окисление с загрязнениями

Общеизвестно, что в основе удаления с поверхностей деталей загрязнений лежит теория моющего действия [4]. Проведен анализ средств очистки, применяемые для очистки загрязненных деталей двигателей сельскохозяйственной техники (таблица 1.1). Наиболее эффективными моющими средствами для деталей двигателей сельскохозяйственной техники являются синтетические моющие средства (СМС) [13-17]. Современные СМС обладают комплексом свойств, которые весьма важны для процессов очистки:

- способностью понижать поверхностное натяжение;

- хорошей смачиваемостью металлических поверхностей и проникаемостью в поры загрязнений; наличие достаточного резерва щёлочности;

- возможность сильно диспергировать загрязнение и стабилизировать суспензии и эмульсии;

- способность понижать поверхностное и межфазное натяжение раствором СМС придают коллоидные (мылоподобные) поверхностно-активные вещества (ПАВ).

Таблица 1.1 – Моющие средства, применяемые для очистки загрязненных деталей двигателей сельскохозяйственной техники

Тип средств	Класс очищающих средств	Составы моющих средств	Представители	Рабочая температура °С
Щелочные растворы и синтетические очистные среды	Щёлочные моющие растворы	Щёлочи, щелочные соли	Каустическая сода, кальцинированная сода, Димер	70-100
	Синтетические моющие средства (СМС)	Минеральные соли, синтетические ПАВ, стабилизаторы.	Лабомид 102, Темп 50 Д, ВИМОЛ, ТЕМП 100 д	60-80
Органические растворители и эмульсионные препараты;	Растворяющие эмульгирующие средства (РЭС-1 / РЭС-2)	Углеводороды, горючие ПАВ, Стабилизаторы хлорированные, углеводороды, негорючие ПАВ, стабилизаторы, ароматические углероды	Дизтоплива, керосин, кенол, толуол, ацетон и др. / АМ-15, Лабомид 313 ДВЛ-25, Лабомид 312	30/25
	Универсальные биоразлагаемые средства	Концентрированные водорастворимые жидкости, разлагаемые анионоактивные и катионоактивные и неионогенные ПАВ.	ЕС-очиститель, ЕС-тракшампунь 250, УМОС, автолик 12, ЕС-Дескавер и др.	15-70

Поскольку все загрязнения обладают свойством отталкивать воду, то вода, в свою очередь обладает большим поверхно-стным натяжением, не смачивает загрязненные поверхности (рисунок 1.2) [14].

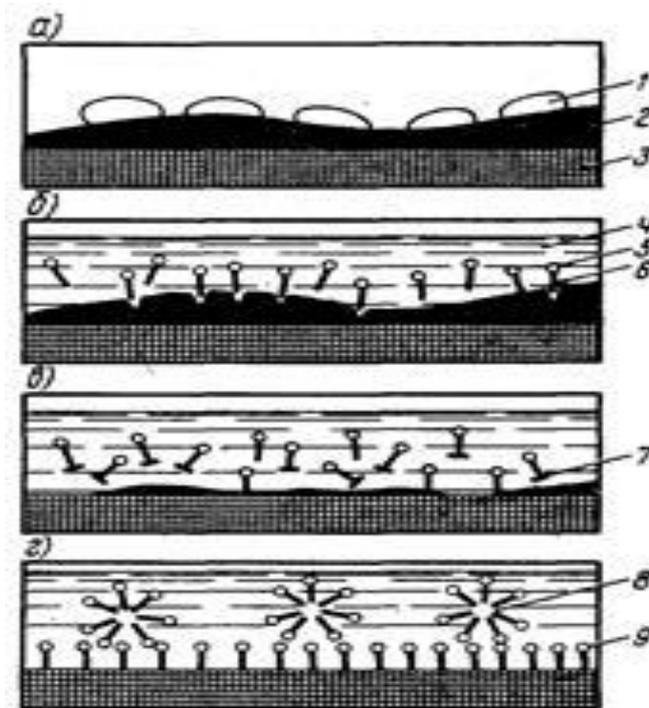


Рисунок 1.2 – Схема технологического процесса очистки:
 1 — капли воды; 2 — загрязнение; 3 — очищаемая по-
 верхность; 4 —
 моющий раствор; 5 — гидрофильная часть молеку-
 лы ПАВ; 6 —
 водоотталкивающая часть молеку-
 лы ПАВ; 7 — переход частиц загрязне-
 ния в
 раствор; 8 — частицы загрязне-
 ния; 9 — адсорбция молекул ПАВ на чистой
 поверхности.

Важным фактором при очистке растворами СМС являются механическое воздействие раствора на загрязнения. Наиболее эффективно загрязнённые поверхности очищаются при повышенной температуре моющего раствора, так как при этом тепловая энергия ускоряет химический процесс размягчения масляных и смолистых загрязнений, усиливаются смачивающие, эмульгирующее и диспергирующие действия компонентов СМС.

Смачивание заключается в растекании капли жидкости, помещенной на поверхность твёрдого тела. Это свойство зависит от поверхностного натяжения жидкости, сочетание составов жидкости и твёрдого тела (рисунок 1.3).

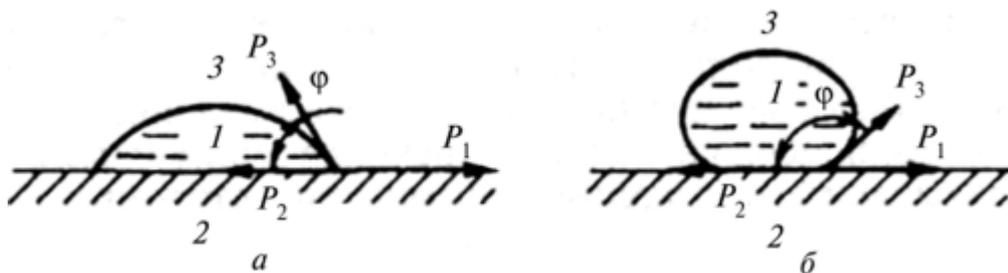


Рисунок 1.3 – Схема взаимодействия капли жидкости с поверхностью твёрдого тела и газовой средой. а - смачивание поверхности; б-поверхность не смачивается; 1-капля жидкости; 2-твёрдое тело; 3-газовая среда (воздух).

К традиционным способам очистки металлических деталей топливных элементов сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки относят метод погружения, очистку струей растворителя, электролитическую очистку, электрогидравлическую очистку, ультразвуковую очистку, пневмо-абразивную (с использованием электрокорунда, гранул CO_2 , гидрокарбоната натрия и гидрокарбоната натрия).

Наиболее распространенным способом удаления загрязнений с поверхности металлических деталей топливных элементов сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки является очистка методом погружения в емкости с моющими растворами [31]. При этом в качестве моющих растворов используются смеси ПАВ, различных растворителей, слабые растворы щелочей и кислот, бензин и керосин. Эффективность очистки увеличивается при перемешивании моющего раствора. Недостатками этого способа является использование большого объема легко летучих веществ – опасных для окружающей среды и здоровья людей. Неионогенные ПАВ не создают ионы в водных растворах и, следовательно, обладают важными преимуществами: они абсолютно невосприимчивы к жесткости воды, демонстрируют высокую эффективность даже при низких концентрациях и температурах. В частности, это: неол АФ 9-10 - этоксилированный нонилфенол, синтанолы ДС-10 и АЛМ-10 - моноалкиловые эфиры полиэтиленгликоля на основе первичных высших

жирных спиртов фракций С10-С16 (ДС-10) и С12-С14 (АЛМ-10), а также поли-этиленгликолевые эфиры моноэтаноламидов синтетических жирных кислот фракций С10-С18 (синтаמיד-5) [118]. Для удаления остатков масел, топлив и смазок применяют растворы щелочных композиций. Щелочные составы представляют собой смесь из нескольких щелочных солей и ПАВ. Дополнительно они должны содержать компоненты для смягчения воды, чтобы соли кальция и магния не воздействовали на ПАВ, предупреждать коррозию черных и цветных металлов, а также сплавов в процессе очистки и межоперационного хранения. Основными щелочными солями являются каустик, кальцинированная сода, триполифосфат натрия, тринатрийфосфат, метасиликат натрия, димер и др. [116, 117]. В компонентный состав наиболее используемых в настоящее время СМС для очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники входят димер и лабомид [1, 2], которые допускают очистку деталей, как из черных, так и из цветных металлов без заметной коррозии. Стоит отметить высокую эффективность для очистки металлических деталей топливных элементов сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 такого щелочного средства, как димер, состав которого включает гидроксид натрия: 5% - 15%, нитрилоацетат натрия - 5% - 15%, неионные ($\geq 5\%$ - $\leq 15\%$) и анионные ($\leq 5\%$) ПАВ. Детали двигателей сельскохозяйственной техники, подлежащие непродолжительному хранению (10-15 суток), не нуждаются в дополнительной противокоррозионной обработке после очистки водными растворами СМС, т.к. эти средства обладают ингибирующим эффектом»

При использовании струйного метода очистки механический фактор проявляется как удар струи на загрязнения, приводящий к их разрушению и вымыванию. Повышение давления воды с 2,5 до 15 МПа при удалении внешних загрязнений приводит к увеличению производительности процесса очистки до 20 раз, снижению энергозатрат в 4 раза и расходу воды в 10 раз.

Авторами [34-38] отмечаются существенные недостатки перечисленных методов, среди которых относительно большие расходы материалов, значительная энергоемкость, комплексное негативное влияние на окружающую среду и человека. Широкие возможности вибрационного поля позволяют успешно осуществлять такие операции, как очистка деталей машин.

Анализ зарубежных литературных источников [112, 113] показывает, что несмотря на пожароопасность нехлорированных углеводородных растворителей (KW), их использование постоянно увеличивается за счет усовершенствования оборудования, в котором интенсификация процессов очистки и обезжиривания осуществляется с помощью ультразвука, флотации и вакуумной сушки. В этом случае KW могут заменять хлорированные углеводородные растворители (СКW) в использующих их методах [44].

Степень химического взаимодействия загрязнения деталей двигателей сельскохозяйственной техники с очистной средой является очень важным показателем. Правильный подбор очистной среды определяет эффективность очистки [45]. Все очистительные среды, применяемые для очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники, можно выделить в две группы [39]:

- органические растворители и эмульсионные препараты;
- щелочные растворы и синтетические очистные среды.

Органические растворители получили широкое применение в зарубежном и отечественном производстве в связи с высокой скоростью удаления загрязнений с деталей двигателей сельскохозяйственной техники, возможностью процесса без механического и термического действия, коррозионной инертностью к деталям из черных и цветных металлов и сплавов.

Наиболее распространенными растворителями являются граничные, ароматические и хлорированные углеводороды. Ароматические и хлорированные углеводороды – хорошие растворители минеральных масел,

старых лакокрасочных покрытий. Однако им свойственна высокая токсичность, а ароматические углеводороды к тому же взрыво- и пожароопасны. Поэтому данные растворители не нашли широкого распространения для деталей двигателей сельскохозяйственной техники. Их использование возможно только при наличии автоматического оборудования.

Основными растворителями, используемыми на данный момент для деталей двигателей сельскохозяйственной техники, являются: дизельное топливо, керосин, бензин и уайт-спирит. Это дешевые и сравнительно малотоксичные растворители. Они используются для очистки внутренних поверхностей деталей двигателей сельскохозяйственной техники: масляных каналов, очистки деталей топливной аппаратуры, электрооборудования и снятия старых лакокрасочных покрытий.

Эмульсионные препараты для деталей двигателей сельскохозяйственной техники представляют собой композицию или систему, содержащую кроме растворителей поверхностно-активные вещества и воду. Эмульсионную очистку применяют, как правило, в тех случаях, когда другие виды очистки слишком длительны и недостаточно эффективны. Одним из путей расширения эмульсионной очистки следует считать повышение очистительной способности дешевых растворителей – ксилола и дизельного горючего подбором эффективных эмульгаторов и поверхностно-активных веществ, растворяющихся в них.

Щелочные растворы нашли наиболее широкое распространение в практике очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники [32]. Преимуществами этих растворов является то, что они сравнительно дешевы, технология использования не требует специального оборудования.

Для повышения очистительной способности в последнее время широкое распространение нашли синтетические моющие средства (СМС) с содержанием поверхностно-активных веществ и активных примесей.

В современных моющих средствах применяются анионо-активные поверхностно-активные вещества и не моногенные поверхностно-активные вещества. Молекулы анионо-активных поверхностно-активных веществ в водных растворах диссоциируют на неактивные катионы (металл или водород) и анионы (углеводные цепи), которые проявляют поверхностную активность. К этой группе поверхностно-активных веществ относятся жировые масла, соли высокомолекулярных спиртов, жирных кислот и другие соединения [41].

В качестве активных примесей к моющим средствам для деталей двигателей сельскохозяйственной техники широко применяются фосфаты, карбонаты и силикаты натрия, усиливающие действие поверхностно-активных веществ и друг друга в соответствующем направлении [42]. Фосфаты обладают сильными пептизирующими свойствами, которые раздробляют крупные частицы загрязнений на более мелкие, иногда до коллоидных размеров. Карбонаты являются наиболее дешевыми электролитами и образуют щелочной резерв в очистном растворе.

Силикаты щелочных металлов при гидролизе дают кремниевую кислоту в коллоидном состоянии. Способность кремниевой кислоты, которая диспергирует твердые и жирные загрязнения, способствует процессу очистки, а также играет большую роль в предупреждении повторного оседания отмытых загрязнений. Присутствие силикатов оказывает противокоррозионное действие.

Обобщая анализ наиболее эффективных очищающих средств, применяемые для очистки загрязненных деталей двигателей сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, как наиболее применимые в условиях использования погружных машин можно выделить неол, синтаид-5, метасиликат натрия, силикат с кремнеземистым модулем 4, полифосфат натрия; соду каустическую и кальцинированную, сульфат натрия при активном использовании

ингибиторов коррозии. Для очистки металлических деталей топливных элементов сельскохозяйственной техники эффективно применимы димер, лабомид и раствор кальцинированной соды.

1.3 Анализ погружных моечных машин для очистки деталей сельскохозяйственной техники

Эффективность очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники определяется способом и средствами очистки, температурой композиции для очистки, ее физико-химической активностью и способом активации. Повышение температуры раствора и давления его распыления на поверхность детали способствуют сокращению продолжительности очистки. Очистка деталей должна производиться с применением комбинированного подхода, включающего химический, механический, термохимический и иные методы обработки в зависимости от степени стойкости загрязнений. Очистка деталей в процессе ремонта агрегатов в основном осуществляется тремя способами: с использованием струи жидкости высокого давления, в моечных камерах, погружением в ванну (наиболее предпочтительный способ), где возможна интенсификация моющего раствора.

В погружных струйных моечных установках на погруженную деталь, вращающуюся вокруг своей оси, направляются струи моющего раствора из множества форсунок, погруженных в раствор. Конструкция погружной машины включает емкость, которая оснащена платформой, предназначенной для подъема и опускания деталей, загруженных в специальную корзину, во время очистки. Перемещение деталей во время очистки обновляет моющий раствор, омывающий деталь, что повышает эффективность очистки. Длина и частота хода платформы регулируются. При необходимости многостадийной очистки деталей эти машины могут быть объединены в линию.

Основой для очистки деталей погружением в ванну является смачивание и растворение загрязнений растворами СМС, щелочными растворами, органическими растворителями, их смесями с эмульгаторами [20].

Погружная моечная установка является специализированным технологическим оборудованием, предназначенным для осуществления процесса очистки деталей посредством их полного или частичного погружения в рабочий моющий раствор. Механизм удаления загрязнений в данных установках реализуется посредством двух основных технологических методов: путём обеспечения перемещения очищаемой детали в среде моющего раствора либо посредством формирования направленных подводных струй, генерируемых посредством системы форсунок, функционирующих от встроенного насосного оборудования.

В соответствии с конструктивными особенностями различают два основных типа моечных установок. Гидрокинетические моечные установки характеризуются размещением очищаемых деталей в герметичной корзине, где обеспечивается комплексное воздействие моющего раствора. Процесс очистки может быть интенсифицирован посредством применения ультразвукового воздействия и барботажа, формируемого посредством пузырьков воздуха высокого давления, подаваемого через систему трубок, расположенных в нижней части корзины. Для обеспечения сохранности деталей пониженной механической прочности в конструкции предусмотрены специальные фиксирующие устройства, исключающие возможность их перемещения в процессе обработки. Дополнительно установка может быть оснащена системой сушки, функционирующей по различным технологическим принципам: инфракрасному, вакуумному или посредством воздействия потоков нагретого воздуха.

Моечные установки платформенного типа характеризуются иным принципом функционирования: очищаемая деталь устанавливается на

платформу посредством ручного или механизированного способа, после чего осуществляется её погружение в рабочий моющий раствор. Процесс очистки может осуществляться посредством следующих технологических методов: посредством осуществления качательных движений платформы в среде раствора, ультразвуковой обработки, барботажа или посредством воздействия подводных струй.

Современное погружное моечное оборудование характеризуется значительным разнообразием конструктивных решений и технологических возможностей. В частности, оборудование производства компании Novatec (Италия) оснащается инновационной системой вакуумной сушки с функцией подогрева воздуха непосредственно в процессе очистки, что обеспечивает существенное повышение энергоэффективности и качества обработки. Особого внимания заслуживают установки, оснащённые замкнутой системой фильтрации рабочей жидкости, обеспечивающие экологически безопасную эксплуатацию без образования сточных вод, что способствует существенной оптимизации производственного процесса и снижению эксплуатационных затрат. [31]

Интенсифицировать процесс погружной очистки можно за счёт использования ультразвуковых колебаний очищающей среды. Принцип активации моющей жидкости в погружной очистке за счет энергии ультразвуковых колебаний получил воплощение в конструкциях ультразвуковых моечных установок. Кавитация может вызвать разрушение практически любого твердого вещества. Решающее значение при очистке от загрязнений играет кавитация, сопровождающаяся захлопыванием кавитационных пузырьков. Захлопывание кавитационного пузырька приводит к генерации локального воздействия в виде ударной волны, либо кумулятивной струи, мгновенное значение давления в которых достигает нескольких тысяч атмосфер. Локальное давление такой силы влечет за собой механическое разрушение (эрозию) близлежащих твердых поверхностей

и сообщает значительные ускорения частицам, взвешенным в жидкости. При захлопывании пузырьков может распадаться на большое количество мелких пузырьков, каждый из которых является зародышем для будущего кавитационного пузырька. Эрозионная активность кавитационных пузырьков значительно меняется с увеличением мощности, вводимой в озвучиваемый объем. Эрозионная активность при разрушении поверхностных пленок под воздействием кавитации в мощных акустических полях широко применяется для интенсификации различных технологических процессов чистки поверхностей от нагара, окалины, ржавчины, абразивных частиц притирочных паст и т. д. Поскольку кавитационному разрушению подвержены твердые тела с различными физико-механическими, электрическими и химическими свойствами, выделяют несколько механизмов эрозионной активности [84, 85]:

- коррозионное разрушение (кавитация и коррозия взаимно усиливают друг друга, так что результирующее разрушение тел в химически активных средах оказывается большим, чем просто суммарное действие этих факторов, взятых по отдельности);

- электрохимические эффекты, обусловленные большими электрическими потенциалами, возникающими при схлопывании каверн на твердой поверхности (известно, что кавитационное разрушение в очень агрессивной среде можно существенно ослабить с помощью «катодной защиты» [86]);

- механическое воздействие кавитации (микроударные волны и кумулятивные микроструйки, образующиеся при схлопывании каверн, способны деформировать поверхностный слой тела и вырывать из него микрочастицы) [87];

- тепловое воздействие кавитации (при схлопывании кавитационной каверны генерируются импульсы высокой температуры; заметим, однако, что тепловая энергия может аккумулироваться только в неметаллических телах с низкой теплопроводностью) [88]. По-видимому, рассматривая

различные задачи гидромеханики, акустики, ультразвуковых технологий, перечень механизмов кавитационного разрушения твердых тел можно продолжить. В работе Ю.М. Дудзинского [89] по результатам проведенных исследований определены амплитудные и частотные характеристики ближнего поля осесимметричного гидродинамического излучателя кавитации и получена теоретическая зависимость удельной энергии упругого экспоненциального импульса, поглощенной в единице объема жидкости, от осевой координаты и избыточного статического давления в жидкости. При том установлена прямая зависимость между удельной поглощенной энергией импульса и эрозией образцов

В статье Минчук В. С., Перхунова А. Ю., Котухов А. В., Дежкунов Н. В. проведено исследование эрозионной активности кавитации, которое представляет значительный интерес для уточнения механизма воздействия кавитации [91]. В работе предложена усовершенствованная методика оценки эрозионной активности акустической кавитации. Приводятся результаты апробации данной методики применительно к задаче исследования распределения эрозионной активности в кавитационной области, генерируемой излучателем со стержневым волноводом. Эксперименты проводились с использованием погружного излучателя с резонансной частотой 32 кГц. Установлено, что при диаметре излучателя меньше или порядка длины волны в используемой жидкости эрозионная активность быстро уменьшается по мере удаления от излучателя и зависит от расстояния до излучателя L как $1/L^3$. Показано, что имеет место корреляция эрозионной активности кавитации и показаний кавитометра, выходным сигналом которого является интегральная интенсивность высокочастотной составляющей кавитационного шума в диапазоне частот до 10 МГц. Для регистрации кавитационного шума использовались пьезоэлектрические датчики. В частности, в жидкостях, характеризующихся более высоким уровнем эрозионной активности, выходной сигнал кавитометра также выше. Показания

кавитометра при этом изменяются в зависимости от расстояния до излучателя как $1/L$. Исходя из полученных данных, предложен метод оценки эрозионной активности кавитации по величине интенсивности кавитационного шума в кубе. Показано, что этот параметр линейно связан с результатами измерений эрозионной активности кавитации.

В практике машиностроительных и ремонтных предприятий нашли применение ультразвуковые установки со стержневыми колебательными системами, установки с колебательными системами в виде согласующих изгибно-колеблющихся пластин и установки с цилиндрическими колебательными системами.

В качестве источника ультразвуковых колебаний используются магнитострикционные и пьезокерамические преобразователи. Первые основаны на эффекте магнитострикции - способности материалов измерять свои линейные размеры под воздействием переменного магнитного поля, вторые - на электрострикционном эффекте - способности материалов менять свои линейные размеры под действием электрического поля.

Существует ряд преимуществ ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники перед другими физико-химическими способами, а именно:

- производительность процесса, технологичность операции и возможность их полной автоматизации;
- высокое качество удаления загрязнений (совокупность ультразвуковых колебаний и химическому воздействию моющего средства обеспечивают качество очистки);
- экологичность процесса (в ультразвуковых установках используются биоразлагаемые моющие средства на водной основе);
- низкая энергоемкость оборудования;
- повышение культуры труда.

1.4 Выводы и задачи исследования

Анализ состояния проблемы позволяет сделать следующие выводы:

1. Многообразие видов и свойств загрязнений на поверхностях деталей сельскохозяйственных машин требует научного обоснования способов интенсификации процесса очистки, обеспечивающих эффективное удаление загрязнений, при низкой энергоемкости.

2. Для интенсификации процесса очистки деталей в погружных моечных машинах применяют следующие способы:

- вибрационная активация очищающей среды (ультразвуковое облучение, виброабразивная обработка);
- перемещение объектов в очищаемой среде (колебательное движение объектов, вращательное движение объектов);
- активация моющего раствора затопленными струями (винтами, сжатым воздухом, насосами высокого давления).

Практика обеспечения очистки деталей при ремонте машин требует уменьшение трудоемкости и продолжительности производственной очистки, то есть интенсифицировать процессы очистки. Вместе с тем, требование обеспечения эксплуатационной надежности и ресурса машин предполагает повышение качество очистки. Эти два важных требования могут быть выполнены путём создания и применения прогрессивных способов и средств очистки деталей. Выбор способа интенсификации процесса очистки осуществляется на основании учета физико-химической активности раствора для очистки и механического воздействия очищающей среды на разрушение загрязнения:

- на эффективность очистки деталей влияет следующие основные технологические и конструктивные факторы:

- физико-химические свойства раствора для очистки и его очищающая способность;

- химический состав загрязнения его прочностные свойства и вид связи с очищаемой поверхностью;
- количество загрязнений, удаляемых с поверхности в единицу времени;
- технологические режимы очистки (степень возбуждения моющей жидкости, режимы его циркуляции в очищаемой системе);
- вид очищаемой поверхности (материал, шероховатость, размеры детали, конфигурация поверхности);
- очищающая среда (состав, концентрация, температура);
- характер и параметры взаимодействия моющего раствора с объектом очистки.

Широкое распространение для очистки для деталей двигателей сельскохозяйственной техники получила ультразвуковая очистка, которая производится в специальных ультразвуковых ваннах, оснащенных генераторами ультразвуковых колебаний (магнитострикционными преобразователями). В качестве моющего раствора при этом применяются щелочные средства с добавлением поверхностно-активных веществ. Распространение ультразвуковых колебаний в моющей среде вызывает кавитацию и акустические течения, способствующие интенсификации механического и химического воздействия моющей среды на загрязнения. Скорость и качество ультразвуковой очистки зависят от следующих явлений: кавитации, акустических течений, давления звукового поля и звукокапиллярного эффекта.

На основании вышеизложенного и исходя из поставленной цели исследования, его основными задачами являются:

1. Исследовать технологические факторы эффективности ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки МТЗ-82, включая анализ влияния интенсивности ультразвуковых колебаний, времени

обработки и конструктивных параметров установки на качество очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники.

2. Обосновать рациональные параметры технологического процесса ультразвуковой очистки, включающие оптимальные значения температуры моющего раствора, продолжительность процесса и расстояние между очищаемой поверхностью и излучателем ультразвуковых колебаний, а также исследовать влияние органических добавок на степень очистки.

3. Провести сравнительный анализ эффективности моющих составов с исследованием влияния различных типов моющих средств (димер, лабомид, кальцинированная сода) на качество очистки при различных температурных режимах.

4. Провести комплексные натурные испытания разработанной технологии очистки с оценкой стабильности процесса, воспроизводимости результатов и качества очистки в производственных условиях

5. Выполнить комплексную оценку технико-экономической эффективности внедрения технологии ультразвуковой очистки распылителей топливной форсунки, включающую определение основных показателей экономической целесообразности применения разработанного технологического процесса.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОГРУЖНОЙ ОЧИСТКИ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

2.1 Сущность процессов ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники

Степень эрозионной активности моющей жидкости, подвергаемой воздействию ультразвуковых колебаний, а также интенсивность, направление и величина акустических течений определяются типом ультразвуковой колебательной системы и удельной акустической мощностью W_a (кВ/м²), передаваемой в очищающую среду:

$$W_a = \frac{N_{э}}{S} \eta_a ; \quad (2.1)$$

где $N_{э}$ – электрическая мощность, потребляемая преобразователем, кВт;

η_a – электроакустический КПД, характеризующий потери при преобразовании электрической энергии в механическую и механической в акустическую;

S – площадь излучателя, м².

Звуковые и ультразвуковые колебания, имея волновой характер, физически эквивалентны между собой.

Частота колебаний системы определяется выражением:

$$F = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}; \quad (2.2)$$

где F – частота, Гц;

T – период колебания, с;

ω – круговая частота, рад/с.

В каждый определенный момент колебания системы любая точка ее характеризуется показателем смещения:

$$a = \sin \omega t; \quad (2.3)$$

или в общем случае:

$$a = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.4)$$

где a – мгновенное значение смещения частицы среды, находящиеся на расстоянии X от излучателя, колеблющегося с амплитудой смещения A ; c – скорость распространения звуковой волны в среде м/с.

$$c = \frac{\lambda}{T}, \quad (2.5)$$

где λ – длина волны, м.

Скорость колебания материальной точки можно определить из выражения:

$$U = \frac{da}{dt} = A \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right); \quad (2.6)$$

ускорение:

$$b = \frac{dU}{dt} = \frac{d^2 a}{dt^2} = A \omega^2 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right); \quad (2.7)$$

Переменное давление, вызываемое волной, характеризуется уравнением:

$$p = \omega A c \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right); \quad (2.8)$$

Амплитуда звукового давления:

$$P = \omega c A; \quad (2.9)$$

где ω – плотность среды, кг/м³;

c – удельная сопротивленение среды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{сек}}$.

При распространении волны происходит перенос энергии без переноса вещества, так как каждая частица среды колеблется относительно своего положения равновесия.

Энергия (E) в единице объема среды, в которой распространяется волна, складывается из кинетической энергии (E_K) и потенциальной волной энергии (E_p):

$$E = E_K + E_p; \quad (2.10)$$

где

$$E_k = \frac{1}{4} A^2 \omega^2; \quad (2.11)$$

при $E_k = E_p$

$$E = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} V^2; \quad (2.12)$$

где V – амплитуда колебательной скорости;

$$V = A\omega; \quad (2.13)$$

Эту величину называют плотностью звуковой энергии.

Интенсивность, или сила звука, определяется выражением:

$$I = E_c = \frac{1}{2} c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} c V^2 \left(\frac{6m}{m^2} \right) \quad (2.14)$$

Максимальные значения смещения (A), колебательной скорости (V) и ускорения (B) частиц среды, в которой распространяется волна, зависят от интенсивности звука и определяется по формулам:

$$A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2I}{c}}; \quad (2.15)$$

$$V = \sqrt{\frac{2I}{c}}; \quad (2.16)$$

$$B = 2\pi f \sqrt{\frac{2I}{c}}; \quad (2.17)$$

мощность (N) источника колебаний:

$$N = IdF; \quad (2.18)$$

где F – замкнутая поверхность, содержащая источник колебаний.

Для плоского ультразвукового пучка с поперечным сечением F :

$$N = IF \quad (2.19)$$

откуда

$$I = \frac{N}{F} \quad (2.20)$$

или

$$I = \frac{p^2}{2c} \quad (2.21)$$

или

$$I = \frac{P_c C}{a}; \quad (2.22)$$

где P – амплитуда переменного звукового давления, n/m^2 ;

P_c – давление излучения, n/m^2 ;

a – константа, близкая к единице.

Исследование влияния частоты колебаний на процесс очистки показало, что частота должна подбираться в зависимости от вида загрязнений [43].

Так, Коган М.Г. считает, что в диапазоне частот порядок 300 кгц действия ультразвука проявляется главным в локальном нагреве загрязнений, так как на высоких частотах идет интенсивное поглощение ультразвуковой энергии, то есть высокие частоты выгоднее применять при очистке от легких жировых загрязнений.

При ультразвуковой очистке на жидкий раствор влияют высокочастотные ультразвуковые волны. Ультразвуковая энергия обычно вводится в раствор с помощью преобразователя, который превращает электрическую энергию в механическую. Звуковые волны генерируют зоны высокого и низкого давления по всей жидкости.

В зонах отрицательного давления температура кипения уменьшается и образуются микроскопические вакуумные пузыри. По мере движения звуковых волн эта самая зона становится зоной положительного давления, что приводит к взрыву пузырьков. Это называется кавитацией и является основой для ультразвуковой очистки. Кавитация оказывает значительное давление и высокие температуры в микроскопическом масштабе, за счет чего ослабляют загрязнение, позволяют растворителю проникнуть глубже в загрязнения и проводить фактическую очистку [118].

2.2 Факторы эффективности ультразвуковой очистки для деталей двигателей сельскохозяйственной техники

Сущность процесса ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники связана с явлением акустической кавитации, связанная с явлением разрыва сплошности среды, которое находит широкое применение для очистки деталей и узлов от технологических (на стадии производства) и эксплуатационных (после операций и технологических процедур) загрязнений. Очистка деталей двигателей сельскохозяйственной техники от загрязнений мощными звуковыми волнами дает технологам потенциальную возможность уменьшения концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Эффективность ультразвуковой очистки базируется на ряде специфических физико-химических явлений, возникающих в жидкой среде при возбуждении в ней колебаний ультразвуковой частоты. К таким явлениям прежде всего относятся кавитация и акустические потоки разной интенсивности, отличающихся скоростью перемещения технологической жидкости и ее насыщенность пузырьками различных размеров. Это объясняется следующим.

В связи с малой прочностью жидкости на разрыв ультразвуковые колебания в отрицательный полупериод, которые достигают максимального (резонансного) размера, а в положительный полупериод начинают адиабатически сжиматься. При определенных условиях объем пузырька при сжатии уменьшается на несколько порядков и давление внутри него может достичь тысяч мегапаскалей, что вызывает визуально наблюдаемое свечение газа. Сжатый до такого высокого давления пузырёк или захлопываются, формируя ударную волну в жидкости, или теряет устойчивость, образуя высокоскоростную кумулятивную струйку жидкости. Это явление носит название кавитационного эффекта способного на разрушение загрязнений и их отделение от поверхности очищаемого объекта. Кроме того,

эффективность ультразвуковой очистки объясняется действием интенсивных микро и макротечений. Диспергирующее, эрозионное, моющее и другие воздействия ультразвука резко возрастает, если очистка проводится при оптимальном состоянии статистического давления и амплитуды звукового давления [48]

В этом случае сокращается продолжительность захлопывания кавитационного пузырька, что приводит к увеличению эффективного давления, действующего на пузырёк в фазе сжатия, следовательно к увеличению скорости движения стенок пузырька и к более высоким значениям давления внутри пузырька.

Максимального очищающего действия по отношению к конкретным загрязнениям можно добиться и за счёт некоторых дополнительных мероприятий, таких как: рациональное размещение ультразвуковых преобразователей, оптимальное расположение, очищаемой поверхности детали относительно излучателя, создание ультразвуковых колебаний относительно двух осей координат и применение одновременно с воздействием ультразвука прокачки моющего раствора через очищаемые полости.

Эффективность ультразвуковой очистки во многом определяется также видом используемого моющего раствора или, как его еще называют, технологической жидкости. Характеристики очистки (скорость и качество) зависят от химического состава моющей композиции. При ультразвуковой очистке применяются как органические растворители, так и щёлочные моющие средства, к которым добавляются поверхностно-активные вещества.

В качестве рабочих жидкостей широкое применение находят хлорированные углеводороды. Сочетание высокой растворяющей способности с пожаро- и взрывобезопасностью делает эти растворители эффективными при ультразвуковой очистке.

При ультразвуковой очистке маслосодержащих загрязнений,

сцепляемость которых между собой и с подложкой определяется свойствами углеводородных компонентов, применяют обычно водные растворы щелочных синтетических моющих средств и органические растворители с различными добавками направленного действия, а при удалении неорганических загрязнений в виде окисных пленок, накипи и других, часто химически связанных с металлом подложки загрязнений, водные растворы интегрированных кислот.

Специфика ультразвуковой очистки предопределяет необходимость тщательного подбора моющих составов, поскольку уникальные характеристики данного метода требуют применения оптимально эффективных чистящих средств. В связи с этим особое внимание уделяется детальному исследованию процесса очистки и подбору результативных моющих растворов, основу которых составляют синтетические поверхностно-активные вещества и органические растворители [49]

Повышение статистического давления в ультразвуковой ванне до определенного значения позволяет улучшить эрозию твердых образцов в десятки сотни раз. Исследование этого вопроса применительно к очистке деталей машин от вязких загрязнений также представляет несомненный интерес. Не освещено в специальной литературе влияние на эффективность ультразвуковой очистки барботирования и циркуляции моющего раствора.

При барботировании моющего раствора газосодержание его увеличивается, что и в свою очередь должно снизить силу гидравлических ударов кавитирующих пузырьков и в то же время увеличить число кавитирующих и осциллирующих, последнее может иметь преувеличивающее значение для очистки от вязких загрязнений. Чрезмерное увеличение барботирования, по-видимому, не приведет к пропорциональному повышению эффективности процесса ультразвуковой очистки, несмотря на большую степень возбуждения моющего раствора, так как при значительном содержании крупных газовых пузырьков в растворе имеет место

демпфирование гидравлических ударов.

Таким образом, должен существовать оптимум степени барботирования.

При циркуляции моющего раствора можно ожидать уменьшения времени ультразвуковой очистки в связи с постоянным поступлением свежего рабочего раствора к очищаемой поверхности и сносом прилипших к рабочей поверхности излучателя и очищаемым поверхностям деталей крупных воздушных пузырьков, которые оказывают демпфирующее влияние на гидравлические удары захлопывающихся пузырьков.

Однако, чрезмерная степень циркуляции может привести к ухудшению качества очистки вследствие сноса мелких осциллирующих и кавитирующих пузырьков с очищаемых поверхностей деталей.

Известно, что в фокусированном звуковом поле происходит измельчение даже сверхтвердых материалов. [50]

Несомненный интерес представляет создание установки с фокусирующей системой ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса ультразвуковой очистки деталей машин.

При очистке деталей двигателей сельскохозяйственной техники от загрязнений традиционно используются моющие растворы, оказывающие разрушительное воздействие на поверхностный слой рабочей поверхности или электроакустические преобразователи, созданные на базе магнитострикторов и пьезокерамики, эффективные только на высоких частотах, поскольку на низких они имеют малый коэффициент полезного действия, а из-за больших габаритов и массы их нецелесообразно использовать на частотах менее 1 кГц. Кроме того, для этого типа источников звука характерны резонансная амплитудно-частотная характеристика и высокая добротность, увеличение полосы рабочих частот приводит к значительному снижению интенсивности звука.

Применение электроакустических преобразователей в звуковых и ультразвуковых технологиях приводит к существенному удорожанию

готового продукта в результате высокой стоимости оборудования, особенно ультразвукового генератора высокой мощности. Этот фактор, по всей вероятности, является основной причиной недостаточного использования возможностей акустических технологий в современных технологиях и аппаратуре.

Факторы интенсификация процесса очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в мощных акустических полях звуковых и ультразвуковых частот обусловлена рядом явлений на поверхности твердых тел:

- ударное влияние захлопывающихся парогазовых каверн;
- радиационное давление звука;
- интенсивные микроскопические течения;
- звуковой капиллярный эффект.

Преимуществами этого способа является:

- высокое качество очистки;
- достаточно значительная скорость обработки;
- применимость различных моющих средств;
- умеренные и комнатные температуры рабочей жидкости.

При этом можно существенно снизить концентрацию в водных растворах ПАВ, при этом существует принципиальная возможность автоматизации процесса.

Можно условно выделить (по типу загрязнения) задачи первичной и вторичной очистки деталей оборудования. В первом случае необходимо очистить поверхности от технологических загрязнений, например от притирочных паст при их изготовлении или после капитального ремонта оборудования. Во втором случае речь идет об очистке деталей оборудования от эксплуатационных загрязнений.

Для оценки интенсивности кавитации в жидких средах используют методы, основанные на сравнении параметров образцов до и после

воздействия на них кавитации. Исходя из того, что кавитационное поле в жидкостях имеет сложный спектральный состав, вызванный акустическим излучением при захлопывании множества пузырьков. Сложный спектральный состав имеет вид широкополосного шума со спектром в полосе от нескольких сотен герц до сотен килогерц. С повышением температуры кавитационное давление уменьшается, поскольку повышается упругость пара в полостях и снижается их кинетическая энергия, что приводит к уменьшению интенсивности ударных волн.

Существует оптимальная скорость струи, при которой имеет место максимальная интенсивность поля акустических волн. Величина оптимальной скорости струи зависит, в частности, от статического давления, геометрических параметров погруженной детали и типа очищающей жидкости. Изменяя гидродинамический параметр скорости струи можно регулировать частоту основного тона генерируемого звука. Однако при этом уменьшается мощность акустических волн вплоть до полного прекращения процесса излучения тонального акустического сигнала.

Ультразвуковая очистка деталей двигателей сельскохозяйственной техники представляет собой сложный физико-химический процесс, основанный на использовании ряда эффектов, возникающих в жидкой среде. Первичными являются эффекты механической природы: кавитация, переменное звуковое давление, радиационное давление, акустические потоки. Первичные эффекты вызывают появление вторичных: нагрев, диспергирование, коагуляция, окисление.

Ультразвуковая очистка определяется во многом кавитационными явлениями. Ультразвуковые излучатели передают высокочастотные колебания раствору. В период полуволны, разрежения в растворе нарушается сплошность и образуются мелкие пузырьки диаметром 50 - 500 мкм, заполняемые парами раствора и растворенными в нем газами. Поэтому жидкости с большой упругостью паров обеспечивают обильное образование

пузырьков. А упругость паров возрастает при увеличении рабочей температуры и снижении температуры кипения растворителей. В период полуволны сжатия кавитационные пузырьки быстро захлопываются и возникают местные гидравлические удары в десятки МПа, в результате действия которых загрязнения разрушаются и удаляются с поверхности изделий [42].

Непрерывные ультразвуковые микровзрывы у очищаемой поверхности способствуют эрозии загрязнения, созданию в нём трещин и проникновению в них моющего агента. Совместное воздействие на загрязнения ультразвуковой кавитации в моющем растворе значительно ускоряет процесс очистки.

На продолжительность процесса и качество ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники также оказывает влияние и амплитуда колебаний, определяющая удельную акустическую мощность. Скорость ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в водных растворах СМС возрастает с увеличением амплитуды колебаний (в пределах 2-30 мкм), интенсивности звукового поля и температуры раствора (в пределах 10-70 °С) [35]. Для прочных загрязнений используется частоты 20...40 кГц, при которых интенсивность воздействия на загрязнения осуществляются в основном за счет кавитации [36].

Выбор параметров ультразвукового поля во многом зависит от вида удаляемых загрязнений и свойств моющей жидкости. Например, слабо связанные с поверхностью загрязнения удаляются под воздействием пульсирующих, незахлопывающихся кавитационных пузырьков и акустических течений. И наоборот, прочно связанные с поверхностью загрязнения удаляются под действием кавитационной эрозии в результате микроударного воздействия захлопывающихся пузырьков.

Эффективность ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники повышается при оптимальном для конкретных

загрязнений соотношении частоты, интенсивности ультразвукового поля, статистического давления и свойств моющей жидкости: химической активности, упругости паров, газосодержания, вязкости и поверхностной активности.

Главными факторами, влияющими на качество ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники, являются продолжительность воздействия ультразвуковой очистки, расстояние очищаемой детали до излучателя ультразвука и интенсивность ультразвуковых колебаний. Необходимая продолжительность ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники зависит от параметров и характеристики загрязнения, а также процессов эксплуатации деталей. Ультразвуковой способ очистки является одним из наиболее эффективных способов гидромеханической чистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники [31, 32]. Таким способом можно очищать загрязнения со степенью очистки 1 микрометр [33]. Однако существенным недостатком ультразвуковой очистки для деталей двигателей сельскохозяйственной техники является ее значительная энергоемкость. Кроме того, при распространении в среде звук отражается, преломляется, рассеивается и поглощается, что характерно для любого волнового движения. Поэтому обработка ультразвуком толстых деталей нежелательна.

Вода и многие другие растворители используются как средства для очистки для деталей двигателей сельскохозяйственной техники. Важно подбирать моющие растворы на основе их способности совмещать кавитационную активность с химическим действием. Для наилучших результатов очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники необходимо провести испытания с каждым набором деталей, чтобы получить оптимальное сочетание концентрации раствора и режимов воздействия ультразвуком

Разнообразие задач и объектов очистки обуславливает необходимость

учитывать множество специфических факторов при реализации процессов и решении проблем автоматизации ультразвукового воздействия в оптимальном режиме.

Предыдущие экспериментальные исследования [5] показали, что механизм кавитационной очистки в основном зависит от мощности кавитации (W , Вт), ее продолжительности (t , мин) и концентрации средства для очистки (ПАВ, щелочной агент, синтетический агент и т.п.) (C , %) и описывается функцией:

$$\Delta K = f(W, t, C), [\%], \quad (2.23)$$

где W – мощность кавитационного устройства, Вт;

t – длительность кавитации, мин;

C – концентрация средства для очистки, %;

ΔK – качество очистки, %.

Приведенные результаты предварительных исследований показывают, что дальнейшее изучение изменения объема материалов при кавитационных процессах может производиться одним из методов моделирования. Исследование влияния вышеперечисленных факторов на относительную потерю объема конструкционных материалов при проведении однофакторных экспериментов связано с значительными трудностями и объемами работ. Поэтому целесообразно провести многофакторный эксперимент для получения уравнения регрессии для функции отклика – качества очистки.

При исследовании указанного процесса в соответствии с (2.23) количеством исследуемых переменных (факторов) равняется трем. Пределы изменения этих факторов обуславливаются пределами изменения W , t и C , при которых получена функция (2.23). Согласно [58] регрессионная модель построена в пределах изменения:

- W , мощность ультразвукового кавитационного устройства – 160...400 Вт;

- t , время обработки в кавитационной среде – 0...40 мин;

- С, концентрация средства для очистки – 10...50 %.

В этом исследовании указаны пределы изменения W , t и C и обуславливают выбор пределов изменения этих факторов при моделировании процесса ультразвуковой очистки деталей. Регрессионная модель будет достоверна в данных пределах. Опыт предварительного моделирования различных процессов показывает, что удовлетворительные результаты можно получить при изменении факторов на пяти уровнях и пяти-шести точках (экспериментов) на один фактор. Согласно (2.23) в качестве вектора исходных данных при определении моделей будут:

$$x_1 = W, x_2 = t, x_3 = C \quad 2.24$$

Увеличение рядов селекции (усложнение модели) осуществляется до тех пор, пока уменьшается погрешность аппроксимации. Полученная модель анализируется с точки зрения ее возможностей и физической сущности. При этом, прежде всего, проверяются наиболее общие положения и требования. По данным анализа производится корректировка структуры модели и уточняются его коэффициенты. Скорректированная по структуре и уточненная модель проверяется экспериментально и подлежит статической проверке исследованному процессу.

2.3 Современные технологии ультразвуковой очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники: направления использования и перспективы интенсификации

На сегодняшний день проведено большое количество исследований очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники с использованием ультразвука. Очистке способствуют кавитационные потоки, индуцированные высокочастотным давлением (звуковыми волнами), которые создают значительное воздействие на прилипающие к разным материалам загрязнители [51].

Результаты комплексных исследований [52, 54, 58, 59] демонстрируют,

что результативность ультразвуковой очистки деталей моторной группы сельскохозяйственной техники детерминирована следующими ключевыми факторами:

1. Технические характеристики ультразвукового оборудования и его акустические параметры;
2. Конструктивная специфика очищаемых компонентов;
3. Природа и физико-химическая характеристика загрязнений.
4. Качественные показатели и составы применяемых технологических жидкостей.

В работе [75] основное внимание уделяется анализу особенностей ультразвуковой очистки компонентов автотракторной техники, оказывающих существенное влияние на её технико-экономические и экологические показатели. К числу таких важных компонентов, представленных на иллюстративном материале (рисунок 2.1), относятся элементы топливной аппаратуры дизельных и бензиновых двигателей (форсунки, инжекторы), а также выпускные клапаны.



Рисунок 2.1 – Детали и элементы сельскохозяйственной техники:
а – форсунки дизельного двигателя; б – инжекторы бензинового двигателя; в – выпускные клапаны

Ключевую роль в обеспечении эффективности процесса ультразвуковой очистки играет корректный выбор ультразвуковой колебательной системы (УЗКС). В производственной практике, охватывающей как основное производство, так и предприятия ремонтно-восстановительного профиля, специализированные мастерские и участки, широкое применение нашли различные типы УЗКС [3], схематично представленные на рисунке 2. К ним относятся стержневые колебательные системы (рисунок 2.2.а), цилиндрические конструкции (рисунок 2.2. б) и плоскостные варианты исполнения (рисунок 2.2. в).

Стержневые УЗКС являются одними из самых эффективных, поскольку их конструкция позволяет регулировать излучающую мощность в широких пределах – от 1–1,5 Вт/см² до 50 Вт/см² и выше. С точки зрения назначения оптимальных режимов такие УЗКС наиболее выгодны. Их основной недостаток – относительно небольшая площадь рабочей поверхности излучателя.

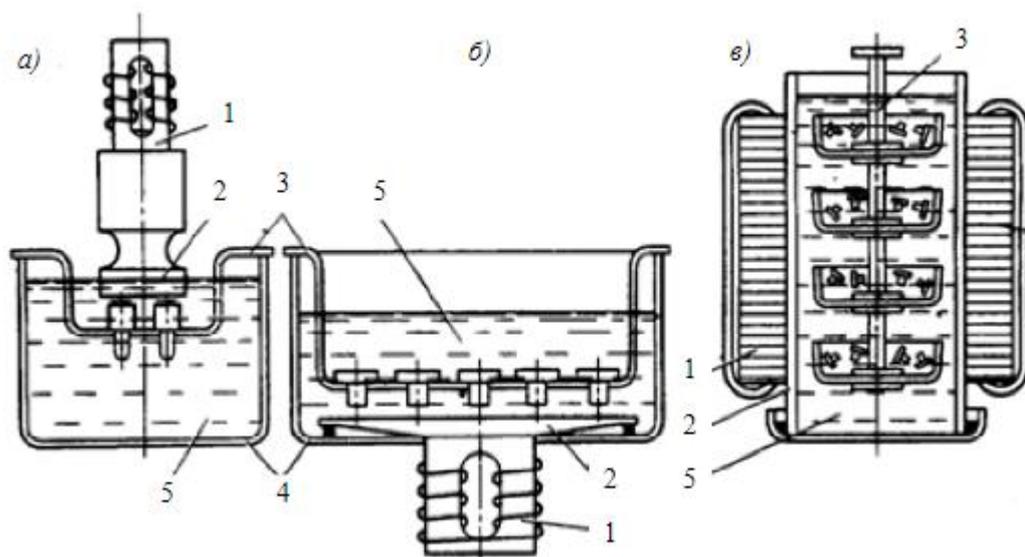


Рисунок 2.2 – Схема ультразвуковых установок:

1 – источник ультразвуковых колебаний (преобразователь); 2 – излучатель; 3 – кассета с деталями; 4 – ванна; 5 – технологическая жидкость.

Цилиндрические УЗКС характеризуются высокой удельной акустической мощностью, однако их практическое применение ограничено

сложностью технологического процесса. Это обусловлено тем, что эффективная зона воздействия локализована строго в центральной части рабочего цилиндра, что требует обязательного перемешивания очищаемых объектов в технологической жидкости. Данный фактор создаёт высокий риск механического повреждения прецизионных изделий.

Плоскостные УЗКС (рисунок 2.2. в) обладают повышенной производительностью благодаря значительной площади излучающей поверхности. Однако их применение ограничено существенной неравномерностью амплитуды колебаний — от 7...10 мкм в центральной зоне до 1...1,5 мкм на периферийных участках, что не гарантирует равномерного качества очистки деталей в кассетах.

С учётом опыта разработчиков ультразвукового оборудования для очистки прецизионных компонентов топливной аппаратуры [56], в рамках проведенных исследований по оптимизации режимов ультразвуковой очистки преимущественно использовались стержневые колебательные системы (рисунок 2.3).

Их технологическое преимущество заключается в возможности широкого регулирования излучаемой мощности и, благодаря сменной конструкции излучателя, в способности адаптировать форму излучающей поверхности для максимального приближения к очищаемому объекту. При этом конфигурация излучающей поверхности может точно соответствовать геометрии загрязнённой поверхности обрабатываемых деталей.

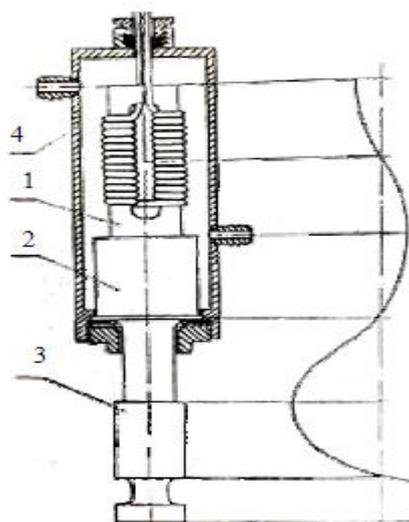


Рисунок 2.3 – Ультразвуковая колебательная система:
1 – двигатель-магнитостриктор; 2 – волновод; 3 – излучатель; 4 – кожух охлаждения.

Существенным технологическим решением, обеспечивающим одновременную очистку множества деталей в специальной кассете, является возможность взаимного перемещения УЗКС и обрабатываемых элементов. Данный подход способствует интенсификации процесса за счёт активного перемешивания технологической жидкости и эффективного удаления загрязнений из труднодоступных зон деталей.

Конструктивные особенности ответственных узлов характеризуются сложной конфигурацией внутренних каналов и полостей для подачи топливно-смазочных материалов к рабочим поверхностям. Эти элементы предъявляют повышенные требования к точности изготовления и параметрам шероховатости, что относит их к категории прецизионных изделий.

Значительное влияние на результативность и продолжительность ультразвуковой очистки оказывает характер загрязнений, которые условно подразделяются на технологические и эксплуатационные. К технологическим загрязнениям, формирующимся в процессе производства, относятся стружка, лаковые и углеродистые отложения. Эксплуатационные загрязнения, являющиеся наиболее стойкими к удалению, требуют создания специфических акустических режимов с интенсивной кавитацией. При этом

загрязняющие частицы подвергаются мощным динамическим нагрузкам от давления схлопывающихся кавитационных пузырьков, достигающего 1000 МПа и выше.

В результате комплексного анализа влияния различных технологических параметров на эффективность процесса ультразвуковой очистки установлено, что определяющее воздействие на продолжительность и качество очистки оказывают следующие ключевые факторы:

1) амплитуда смещения излучателя УЗКС, которая напрямую зависит от типа используемой УЗКС, мкм.

2) вид технологической жидкости и концентрация химических компонентов в моющей жидкости, К, г/л;

3) температура моющего раствора (технологической жидкости), °С.

Оптимальные значения перечисленных факторов, как правило, определяются проведением многофакторного планирования эксперимента [75], получение математической модели процесса ультразвуковой очистки и на ее основе расчета оптимальных значений факторов, определяющих оптимальные режимы ультразвуковой очистки: – при очистке от эксплуатационных трудноудаляемых загрязнений $\xi = 12$ мкм; $t = 56,6^\circ\text{C}$ и $K = 28,7$ г/л; –при очистке от технологических загрязнений с относительно слабой адгезией $\xi = 37$ мкм; $t = 67^\circ\text{C}$; $K = 30$ г/л.

В работе [61] проведены экспериментальные работы по определению ресурса двух моющих растворителей, используемых для очистки деталей тракторного двигателя в обычных и ультразвуковых моечных машинах. Эксперимент проводится при различных настройках параметров обеих машин. Наблюдения проводились в течение 15 дней с использованием двух типов очищающих средств, а именно AFSO CLEAN-AD20 и METACLEAN 211. После анализа данных был сделан вывод, что если эти растворители используются в обеих сменах в отрасли, то растворители являются весьма полезными для очистки двигателя трактора.

Для оценки уровня эффективности ультразвуковой очистки для деталей двигателей сельскохозяйственной техники в промышленности используются разные методы [62, 63]. Метод Millipore используется для удаления загрязнений с частей образца путем очистки щеткой и очистки растворителем в ультразвуке и фильтрации растворителя для удаления загрязнений, а затем определения количества и природы удаленных загрязнений. Однако используемый процесс очистки не обеспечивает полного удаления присутствующих загрязнений и при успешной практике будет получен выход 50% по всем загрязнениям [64, 65].

Двигатели сельскохозяйственной техники состоят из очень сложных, детализированных механических элементов, требующих высокого качества очистки. Смазочное масло, гидравлическое масло и мазут в таких двигателях всегда должны быть высокого качества и фильтроваться через небольшую металлическую систему фильтров, чтобы обеспечить удаление всех примесей, возникающих во время работы [71], [72], [73]. Со временем масляный фильтр засоряется примесями (крупными частицами или продуктами), которые были отфильтрованы из масла, а также различными загрязнителями, включая деятельность микроорганизмов [73], [74]. В целом эти примеси существенно снижают производительность фильтрующего устройства. Таким образом, чтобы стабилизировать производительность устройства, необходимо регулярно заменять или очищать загрязненный масляный фильтр. Для очистки масляного фильтра обычно применяется любой из этих двух распространенных методов:

- очистка растворителем в сочетании с ручной очисткой;
- очистка растворителем в сочетании с ультразвуковыми волнами.

В процессе традиционной ручной очистки растворителем часто используются сильно поляризованные растворители, например, содержащие атомы галогена, например, соединения метилгалогенида [73], [75]. Использование этих соединений не только вызывает коррозию фильтров и

вред для окружающей среды, и механиков, но и при обычной ручной очистке тратится большое количество растворителя. Таким образом, с этой точки зрения ультразвуковая очистка, при которой используются меньшие количества менее агрессивного растворителя, будет более подходящим методом, чем обычная ручная очистка.

Исследовано [76] влияние частоты вибраций на процесс очистки и установлено, что частоту вибрации необходимо выбирать в зависимости от типа загрязнения. На высоких частотах ультразвуковая энергия интенсивно поглощается, поэтому в диапазоне частот 300 кГц действие ультразвуковых волн проявляется в основном в локальном нагреве загрязнителя.

Для прочных загрязнений используются частоты от 20 кГц до 40 кГц, при этих частотах интенсивность воздействия на загрязнитель в основном обусловлена кавитацией.

Определена модель воздействия энергии единичного кавитационного пузырька с определённой массой загрязнения. Приведены расчетные зависимости глубин проникновения струйки пузырька в асфальтосмолистые отложения на деталях двигателя с пределом прочности загрязнения 10 МПа от отношения R_{max} / R_{min} и частота колебаний [77].

Анализ зависимости показывает, что для асфальтосмолистых отложений, имеющих толщину загрязнений в диапазоне от 0,5 мм до 0,7 мм необходимо создать частоту колебаний в диапазоне от 20 кГц до 30 кГц.

В последние годы исследовательские применения ультразвуковых волн для очистки поверхностей деталей двигателей сельскохозяйственной техники привлекают внимание многих ученых всего мира как инновационная технология и приоритет для дальнейших исследований и разработок [76-79].

Существует три механизма разрушения поверхностных кавитационных загрязнений пузырьками: отслойка, струйная очистка и эмульгирование. Очень важным параметром, влияющим на эффективность процесса очистки, является интенсивность ультразвука.

Выбор интенсивности зависит от вида изделия, характера загрязнения, моющей жидкости и т.д. В зависимости от вида загрязнений целесообразно использовать следующие значения интенсивности [63]:

- до $1 \dots 3 \text{ Вт/см}^2$ – для легких загрязнений (масляных и жировых);
- от 3 до 10 Вт/см^2 – для средних загрязнений;
- более 10 Вт/см^2 – для сильных загрязнений (лаковых пленок, травильных шламов);
- до 100 Вт/см^2 – для очистки протяженных каналов малого диаметра.

В.М. Приходько, Б.А. Кудряшовым и И.В. Багровым была разработана технология и система оборудования для ультразвуковой очистки деталей. Она состоит из трех компонентов [62]:

- резервуар для жидкого раствора,
- генератор, являющийся источником электрической энергии,
- преобразователь, превращающий электрическую энергию в механическую.

Вся эта конструкция находится в корпусе и имеет дисплей параметров очистки. Резервуар может быть разработан под конкретный тип деталей, позволяющий применять этот метод очистки в многих отраслях.

Большинство ультразвуковых генераторов принимают стандартный вход переменного тока с частотой 50 – 60 Гц, а затем превращают его в постоянный. Размеры варьируются от настольных блоков от 200 Вт до больших блоков мощностью 1000 Вт [33]. Преобразователи могут быть прикреплены к резервуару или может быть использован погружной преобразователь. Количество и положение таких преобразователей определяются размером и конфигурацией деталей, размером резервуара и т.п.

Технология включает этапы очистки в ультразвуковой ванне:

1. Этап предварительного замачивания, который очень важен для эффективности системы. На этом этапе деталь помещают в нагретый моющий раствор, удаляющий всю химически растворимую грязь и общие

загрязнения.

2. Основной этап ультразвуковой очистки, при котором очистка выполняется с помощью кавитации в растворе.

3. Промывка чистой части. Ультразвук также может применяться на этом этапе для повышения эффективности [3].

Образование кавитационных пузырьков при очистке детали является сложным процессом, на который влияет много факторов: температура моющего раствора, концентрация моющей жидкости, состав моющей жидкости, форма и материал детали, мощность ультразвукового излучателя, состав загрязнителя, время очистки детали [13]. Вариации и комбинации этих факторов влияют на количество образовавшихся кавитационных пузырьков, а также на эффективность очистки деталей.

2.4 Выводы по главе

Ультразвуковая очистка — это сложный физико-химический процесс, в котором используется ряд эффектов, возникающих в жидкой среде. К ним относятся кавитация, переменное звуковое давление, давление излучения и акустический поток. Существуют следующие факторы, которые влияют на эффективность ультразвуковой очистки: интенсивность ультразвукового поля, температура, время, концентрация и физико-химические свойства моющего раствора.

Эффективность ультразвуковой очистки повышается, если соотношение частоты, напряженности ультразвукового поля, статистического давления и свойств моющего раствора (химическая активность, упругость паров, вязкость, поверхностная активность) оптимально для конкретного загрязнения.

Предварительные исследования зарубежных исследований показали, что на процесс очистки наибольшее влияние оказывают температура моющего раствора, концентрация моющего средства и время очистки детали. Также

рассматривалось влияние температуры раствора для очистки и частоты ультразвукового излучения на количество смытого загрязнения.

Однако на данный момент нет экспериментальных исследований, учитывающих влияние всех основных факторов на очистку деталей двигателей сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 в малогабаритных (5...10 л) ультразвуковых ваннах.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Объекты и методы лабораторных исследований

В качестве объектов очистки использованы детали сельскохозяйственной техники на примере трактора МТЗ-82 в виде распылителя топливной форсунки двигателя.

Лабораторные эксперименты выполняли на ультразвуковой установке «УЗДН-А» с постоянной частотой колебаний (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Ультразвуковая установка «УЗДН-А» с постоянной частотой колебаний

Ультразвуковая установка «УЗДН-А» представляет собой высокотехнологичное лабораторное оборудование, предназначенное для проведения операций по очистке и обработке компонентов сельскохозяйственной техники.

Данное техническое средство разработано для эффективного удаления различных типов загрязнений с поверхностей обрабатываемых деталей, включая масляно-грязевые отложения, коррозионные образования и устаревшие лакокрасочные покрытия (рисунок 3.2)

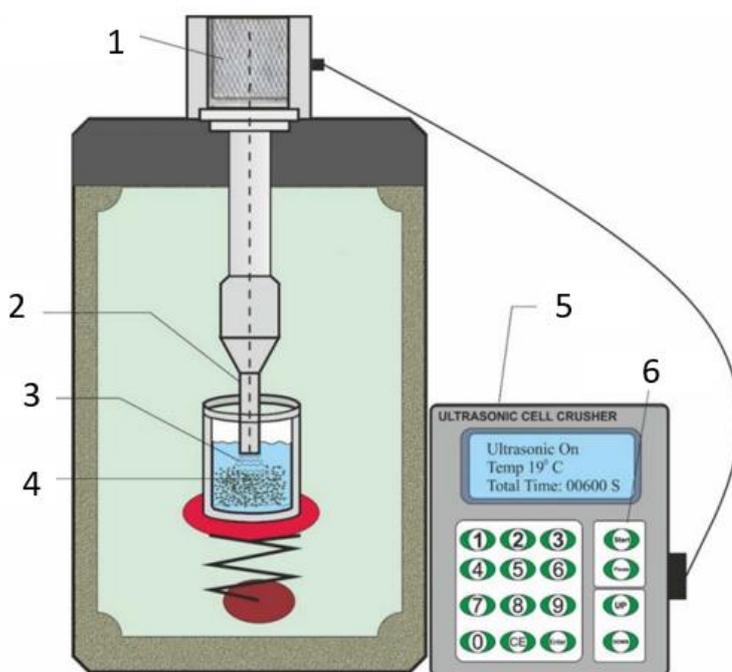


Рисунок 3.2 – Функциональная схема ультразвуковой установки «УЗДН-А»: 1 - преобразователь, 2 – ультразвуковой зонд, 3 – ультразвуковая кавитация, 4 – испытуемый образец, 5 – генератор, 6 – блок управления.

Принцип функционирования установки базируется на комплексной работе следующих технических элементов.

В процессе эксплуатации блок управления (6) осуществляет координацию всех технологических процессов посредством программного регулирования параметров работы оборудования. Генератор (5) выполняет преобразование входного электрического напряжения промышленной сети

220В (частота 50-60 Гц) в высокочастотный электрический сигнал с частотой 20–25 кГц.

Полученная высокочастотная энергия посредством преобразователя (1) трансформируется в механическую энергию продольных вибрационных колебаний ультразвуковой частоты. Данные колебания передаются на ультразвуковой зонд (2), который генерирует акустические волны в рабочей жидкости, создавая интенсивное кавитационное поле.

В зоне воздействия ультразвукового излучения формируется ультразвуковая кавитация (3), представляющая собой основной рабочий процесс устройства. Образующиеся кавитационные пузырьки оказывают комплексное физико-механическое воздействие на поверхность испытуемого образца (4), что обеспечивает эффективное удаление различных типов загрязнений.

Конструктивное исполнение предусматривает интеграцию всех компонентов в единую технологическую систему посредством специализированных соединительных кабелей. Технические характеристики представленные установки «УЗДН-А» представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики установки «УЗДН-А»

Показатель	Значение
Рабочая частота генератора и излучателя, кГц	22
Максимальная выходная электрическая мощность блока питания на эквиваленте нагрузки, не более, Вт	130
Двойная амплитуда колебания рабочего торца излучателя с конической насадкой на воздухе, не менее, мкм	20
Автоматическая выдержка длительности диспергирования, с (мин)	1-99
Время непрерывной работы диспергатора при максимальной интенсивности, не более, мин	20
Номинальная потребляемая электрическая мощность, не более, Вт	300
Напряжение питания от сети переменного тока частотой 50 (60) Гц, В	220 (110/115)
Габаритные размеры, мм	295x290x550
Масса, кг	40

Требуемое положение горизонтально ориентированных распылителей топливной форсунки двигателя МТЗ-82 обеспечивали с помощью проволочных держателей.

Экспериментальные исследования моющей среды проводились следующим образом. В раствор погружалась партия из 5 единиц распылителей топливной форсунки двигателя МТЗ-82 и интенсивно перемешивалась в определённом режиме ультразвуковой очистки. Партия ежеминутно извлекалась из раствора, высушивалась путем продувания теплым воздухом и взвешивалась на электронных весах. Экспериментальные исследования проводились с трёхкратным параллельным повторением при стабильном температурном режиме и варьировании концентрационных параметров моющего раствора. Режимы ультразвуковой очистки менялись в зависимости от длительности процесса, температуры моющего раствора и концентрации водного раствора компонентов очистки.

Степень и тип загрязнения распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 методом ЯМР-спектроскопии с использованием спектрометра ядерно-магнитного резонанса высокого разрешения марки VNM - 3H - 60. Метод ЯМР позволяет наиболее точно и конкретно определить тип и содержание разнотипных нагаров и асфальтосмолистых отложений без использования стандартных образцов, в нем проводят комплексный анализ спектральных данных ЯМР (величин химических сдвигов, мультиплетности и относительной интенсивности сигналов в спектрах). Метод определения структурно-группового состава загрязнений основан на соответствии количества сигналом в спектре ЯМР углерода C^{13} и неэквивалентных типов углерода в соединении, мультиплетности полученных сигналов, числа атомов водорода на атоме углерода, а также аддитивности химического сдвига углерода C^{13} . Обработка результатов исследования проводилась по методике, принятой при определении структурно-группового загрязнений с использованием ЯМР - дефектоскопии.

Степень очищения распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 оценивается отношением (в процентах) массы загрязнителя, удаленного с ее поверхности, к его начальной массе.

Кинетика процесса очистки с учетом активности кавитации описывается уравнением:

$$\frac{\Delta m}{m} = 1 - e^{(-\alpha * K^{0,5})} \quad (3.1)$$

где Δm и m - удалённая и исходная масса материала.

Лабораторные эксперименты по сравнительной оценке режимов, обеспечивающих максимальное очищающее действие по отношению к конкретным загрязнениям, проводятся в следующем порядке.

Для очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 были исследованы три моющих раствора:

- димер – высококонцентрированное щелочное моющее вещество, используемое для очистки автомобильного транспорта;
- лабомид – комплексное соединение активных веществ на основе солей, применяемое для очистки узлов и деталей (двигатель, редуктор и др.);
- раствор кальцинированной соды.

Было исследовано влияние содержания различных органических растворителей на эффективность очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 с целью оценки их воздействия на топливные отложения на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82. Были исследованы трихлорэтилен, ацетон, дихлорэтан и изопропиловый спирт.

С целью исследования влияния температуры и концентрации моющего средства, а также времени процесс на степень очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 из углеродистой стали в машинах, использующих ультразвуковой метод очистки, был использован метод планирования многофакторного эксперимента.

Уровни варьирования факторов составляли:

- концентрация моющего средства – 50 г/л;

- температура моющего раствора - 10 °С;
- время очистки – 1 мин;

Границы варьирования составляли:

- концентрация моющего средства – 0-400 г/л;
- температура моющего раствора – 30...80 °С,
- время очистки – 1-15 мин.

При проведении эксперимента и построении модели степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 моющими растворами применялся метод ортогонального центрального композиционного планирования. Ортогональным называется план, для которого выполняется условие парной ортогональности столбцов матрицы планирования, в частности,

для независимых переменных $\sum_{u=1}^N x_{iu}x_{ju} = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, k}$, где N – количество точек плана эксперимента, k – количество независимых факторов.

При ортогональном планировании коэффициенты полинома определяются независимо друг от друга – вычеркивание или добавление слагаемых в функции отклика не изменяет значения остальных коэффициентов полинома. Для ортогональных планов эллипсоид рассеяния ориентирован в пространстве так, что направления его осей совпадают с направлениями координат пространства параметров. При ортогональном центральном композиционном планировании (ОЦКП) критерием оптимальности плана является ортогональность столбцов матрицы планирования. Ортогональность плана второго порядка можно обеспечить, если преобразовать переменные и специальным образом выделить координаты «звездных» точек.

При обработке полученных результатов использовались методы математической статистики программного комплекса STATISTICA 10.

3.2 Методика натуральных испытаний

На основании проведенных исследований и полученных результатов разрабатывался технологический процесс очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82.

Работы в производственных условиях заключались в корректировке технологического процесса очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 применительно к условиям ремонтного предприятия.

Натурные испытания проводили в условиях очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 на ультразвуковой установке УЗДН-А с постоянной частотой колебаний.

Опытно-производственная проверка и внедрение разработанного технологического процесса осуществлялись на специализированных предприятиях по ремонту деталей двигателей сельскохозяйственной техники.

ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Идентификация видов загрязнений деталей двигателей сельскохозяйственной техники с целью выбора типа чистящего раствора

Технология ультразвуковой очистки деталей машин сельскохозяйственного назначения определяется составом и свойствами удаляемых загрязнений, видом производимых ремонтно-обслуживающих работ и назначением машины.

Была проведена идентификация типов загрязнения распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 методом ЯМР-спектроскопии с использованием спектрометра ядерно-магнитного резонанса высокого разрешения марки VNM - 3H - 60, результаты которой приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Идентификация основных типов и свойств загрязнителей исследуемых деталей двигателей сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82

Загрязнения	Состав	Содержание, % мас.	Предел прочности на сжатие, Мпа [118]	Адгезия, Мпа [118]	Условный коэффициент прочности, К [118]
Продукты топливных отложений	Воск, гудроны и олефины	40	40	0,5	4,0
Асфальтосмоллистые отложения	Парафины, смолы, асфальтены, связанная нефть, вода, сера	40	40	0,3-6	1,0
Нагар	Углерод, асфальтены, карбены, карбоиды, свинец, железо	20	30	0,5-7	2:0

Важно отметить, что основные характеристики в таблице 4.1 по свойствам загрязнителей исследуемых деталей двигателей сельскохозяйственной техники в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 взяты из работы [118].

Алгоритм выбора органических растворителей, которые соответствовали бы особенностям технологического процесса ультразвуковой очистки, представлен на рисунке 4.1.

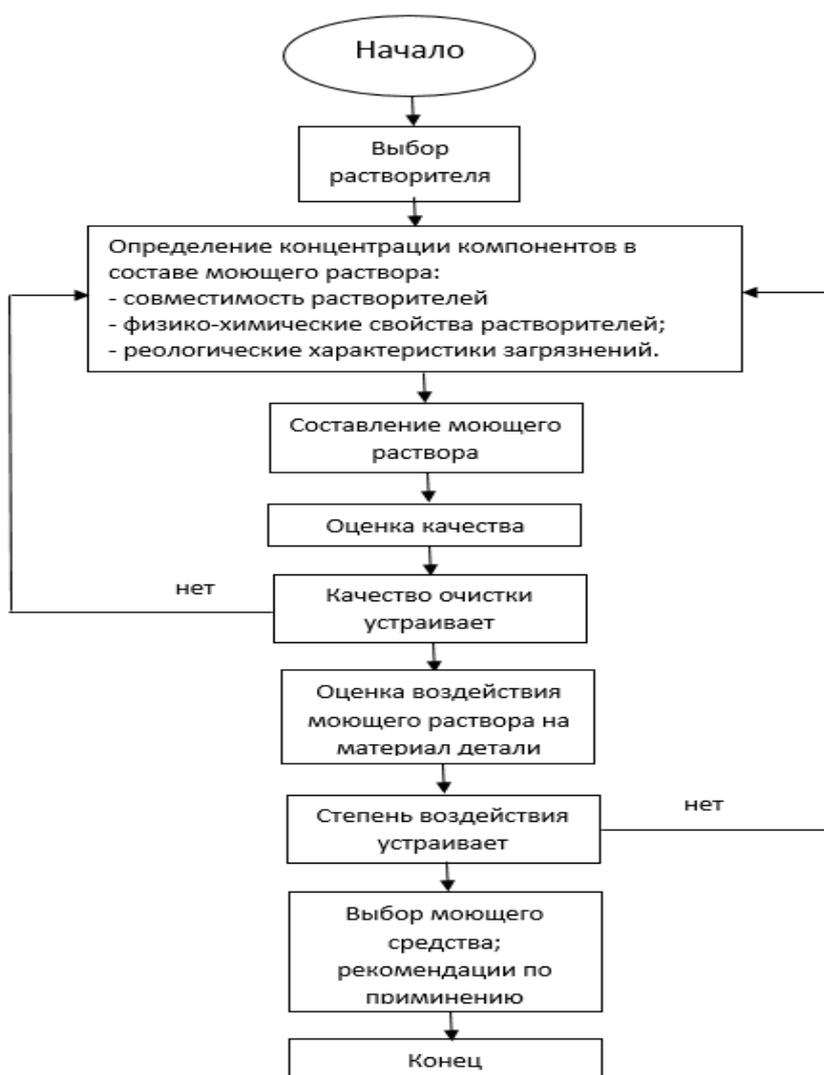


Рисунок 4.1 – Алгоритм выбора органических растворителей в качестве моющего средства для ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82

Руководствуясь вышеизложенным, можно сформулировать критерии выбора моющего раствора для удаления загрязнений:

- химическое средство загрязнением углеводородного класса;
- пожаробезопасность и нетоксичность;
- экологическая безопасность, высокая степень биологического разложения в сточных водах;
- высокая моющая способность при температуре моющего раствора 60-90 °С;
- минимальная продолжительность очистки;
- способность воздействия на загрязнения без повреждения рабочих поверхностей деталей, в том числе без коррозионного поражения;
- низкая стоимость.

Данные проведенного литературного обзора подтвердили возможность и целесообразность удаления загрязнений моющим раствором в ультразвуковом поле. В теоретическом плане выявлялись наиболее эффективные технологические режимы ультразвуковой очистки в моющем растворе. Установлено, что при использовании водных растворов очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники процесс ускоряется при повышении температуры до 70 °С [62].

Если же использовать в ультразвуковой ванне органические растворители, то максимальное очищающее действие проявляется при более низких температурах и зависит от вида растворителя, упругости его паров и растворимости загрязнений в нем [63]. В связи с этим в целях повышения эффективности ультразвуковой очистки считаем целесообразным в состав растворов очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники добавлять органические растворители. Каждый компонент растворов очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники выполняет свою определённую функцию. Органический растворитель обеспечивает высокую моющую способность растворов очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 за счёт химического средства к удаляемому загрязнению. Активные щелочные добавки и ПАВ повышают моющую способность

раствора за счёт омыления органических соединений и адсорбции, следствием чего является значительное ускорение процесса очистки.

Было исследовано влияние содержания различных органических растворителей на эффективность очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82. Согласно рекомендаций Н.Ф. Тельнова для различных моющих растворов из [13], были исследованы трихлорэтилен, ацетон, дихлорэтан и изопропиловый спирт при различных температурных режимах очистки - 30, 50 и 70 °С. На рис. 4.2-4.4 представлены результаты влияния вида и содержания органических растворителей на качество очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30, 50 и 80 °С.

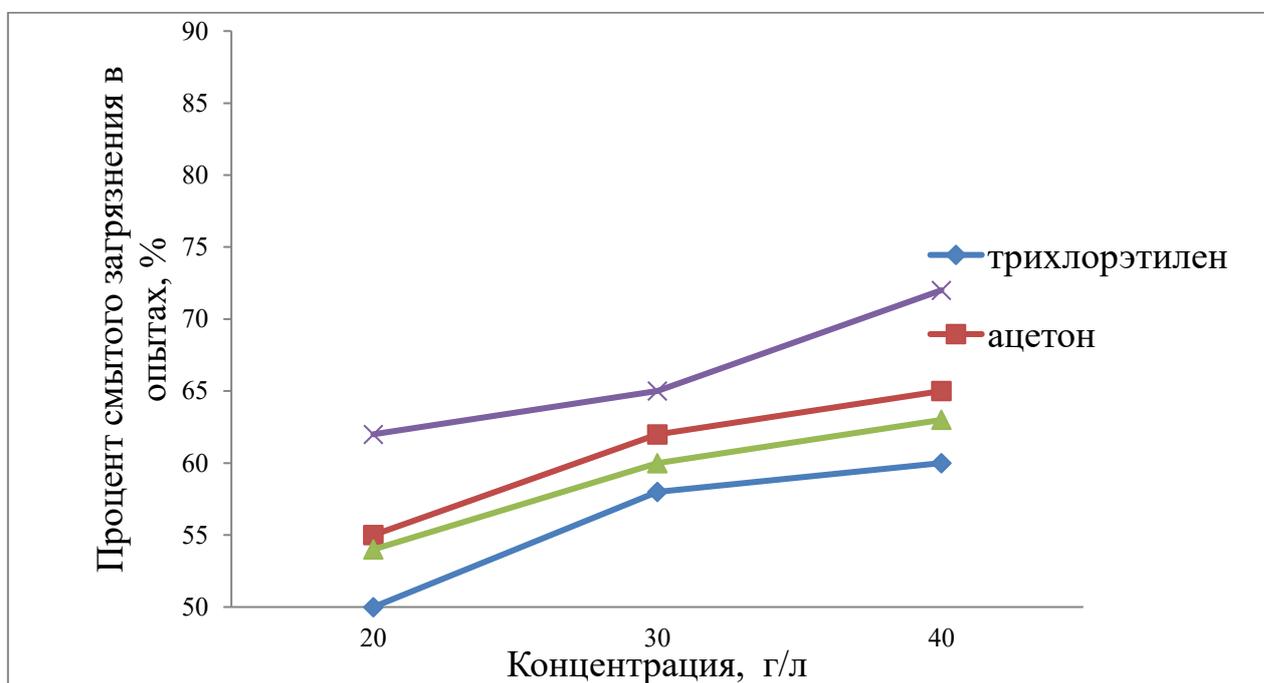


Рисунок 4.2 – Результаты влияния вида и содержания органических растворителей на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30 °С

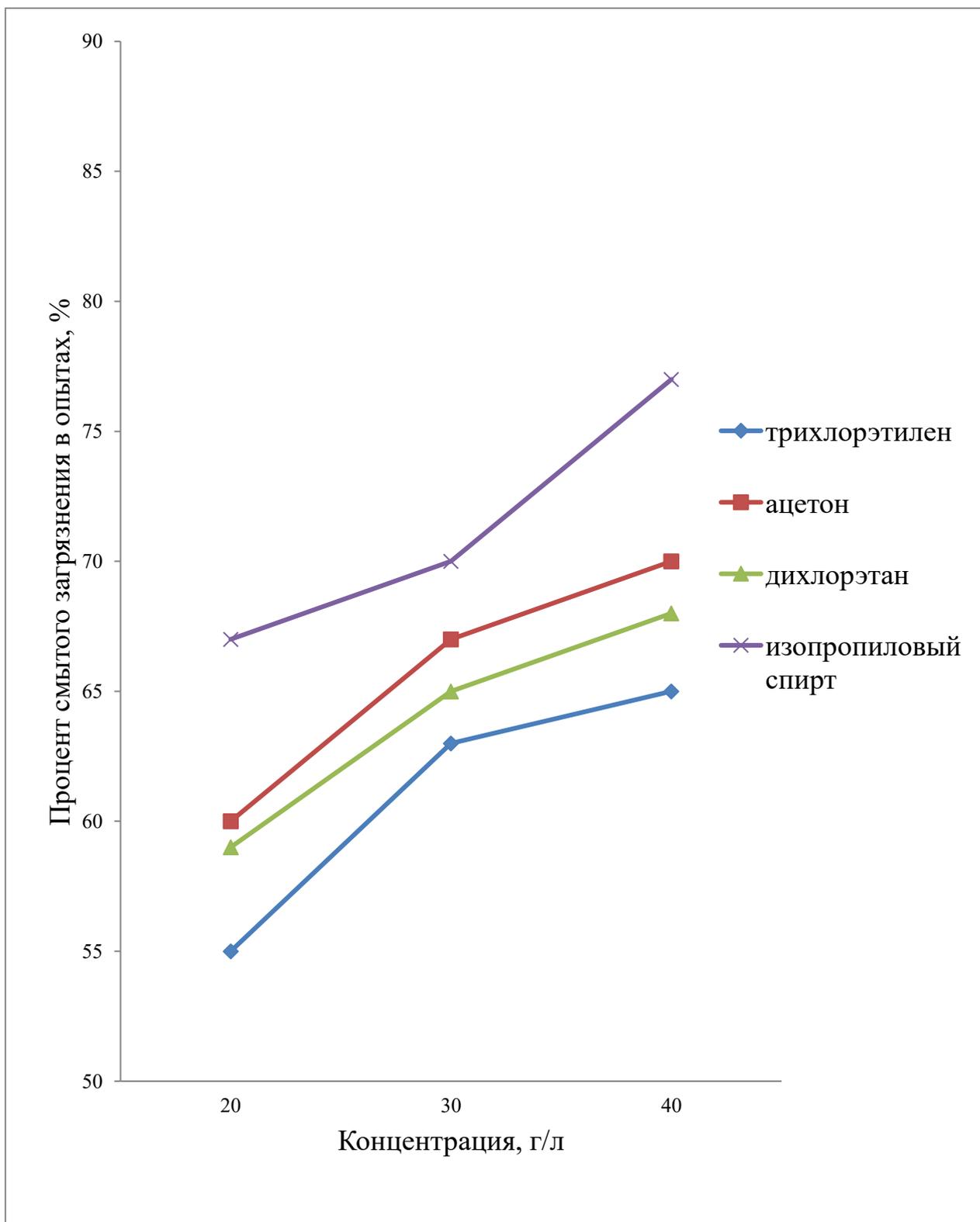


Рисунок 4.3 – Результаты влияния вида и содержания органических растворителей на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 50 °С

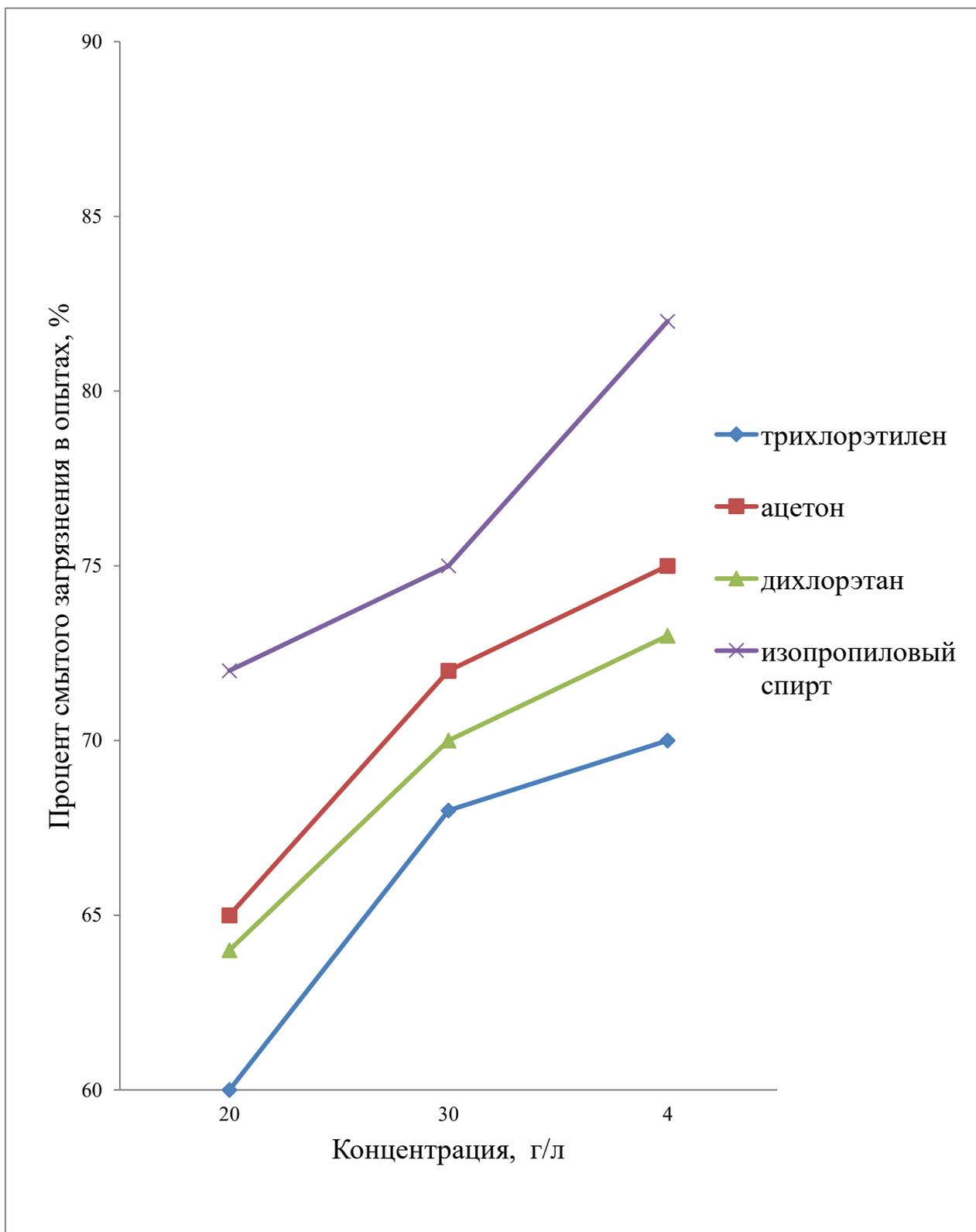


Рисунок 4.4 – Результаты влияния вида и содержания органических растворителей на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 80 °С

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что наиболее эффективным органическим растворителем, как компонент водного раствора очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, является изопропиловый спирт при его концентрации 40 г/л.

Для очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 от загрязнений были исследованы три моющих раствора:

- димер – высококонцентрированное щелочное очищающее вещество, используемое для очистки автомобильного транспорта;
- лабомид – комплексное соединение активных веществ на основе солей, применяемое для очистки узлов и деталей (двигатель, редуктор и др.);
- раствор кальцинированной соды.

На рисунках 4.5 - 4.7 представлены результаты влияния вида и содержания очищающего компонента раствора на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30, 50 и 70 °С. Качество очистки от концентрации моющего средства имеет логарифмическую зависимость. При увеличении концентрации до определенной величины моющее действие резко увеличивается и достигает максимального эффекта очистки в определенной точке, после чего эффект очистки стабилизируется.

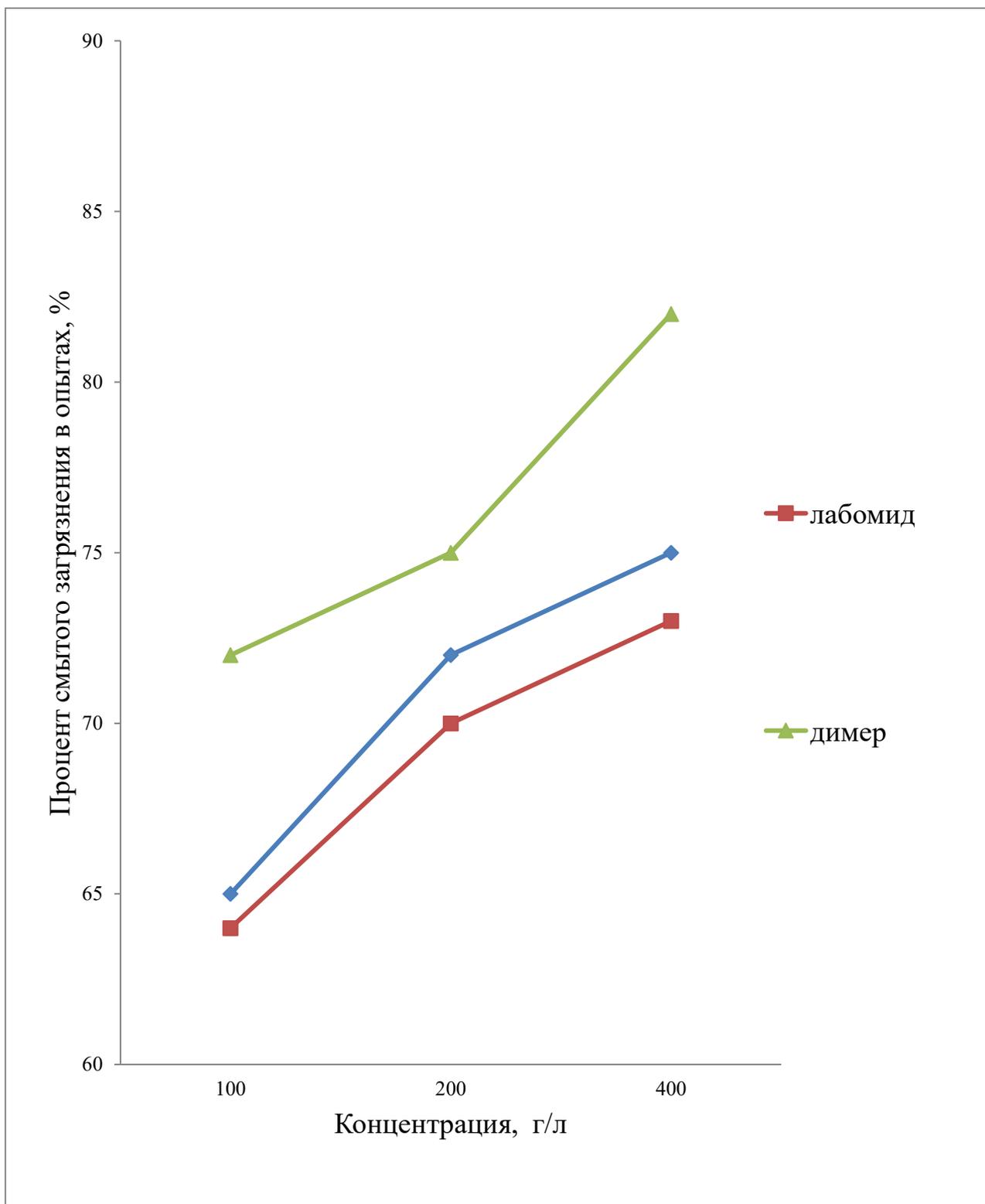


Рисунок 4.5 – Результаты влияния вида и содержания компонента раствора для чистки на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30 °С

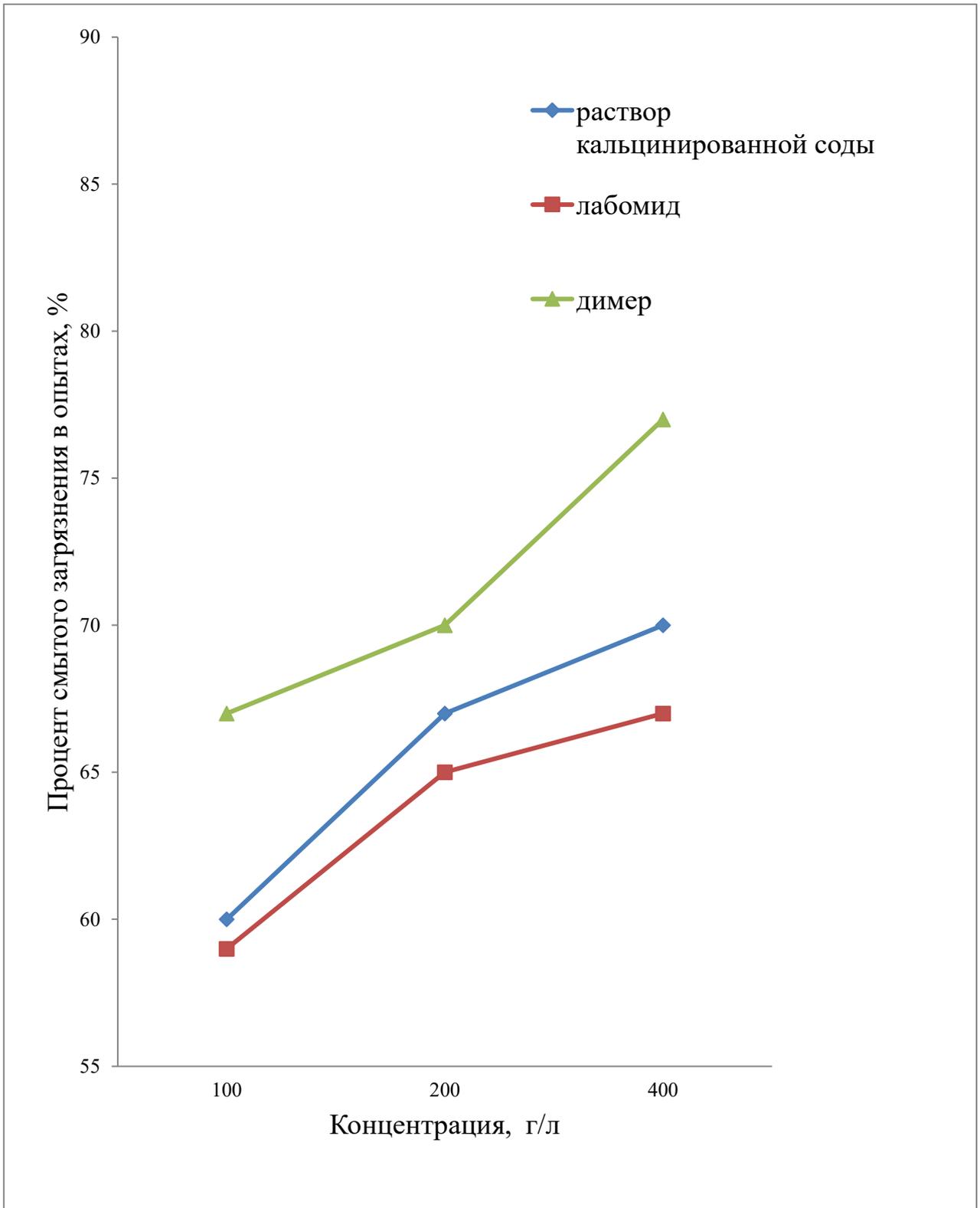


Рисунок 4.6 – Результаты влияния вида и содержания чистящих компонентов раствора на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 50 °С

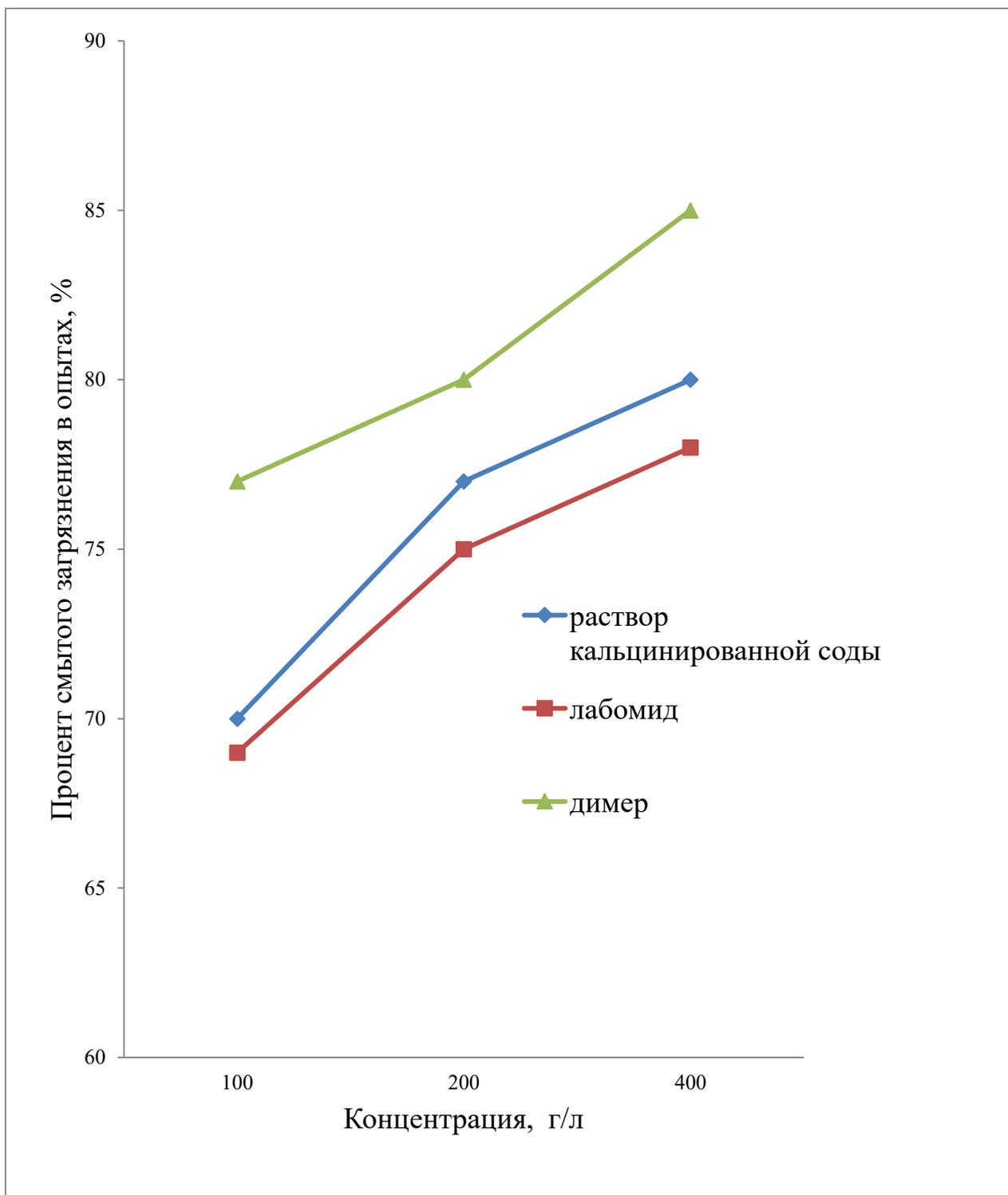


Рисунок 4.7 – Результаты влияния вида и содержания чистящих компонентов раствора на уровень очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 80 °С

Из результатов рис. 4.5-4.7 видно, что все компоненты растворов очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 положительно

вливают на эффективность очистки, при этом наиболее эффективным является димер. Их эффективность очистки повышается с увеличением температуры.

На основании проведенного анализа был сделан вывод о возможности разработки и внедрения ресурсосберегающего технологического процесса удаления загрязнений моющим раствором в ультразвуковом поле, как наиболее качественного, эффективного и высокопроизводительного.

4.2 Исследование эффективности интенсивности процесса ультразвуковой очистки от расстояния очищаемой поверхности от излучателя

На рисунках 4.8 - 4.9 была получена зависимость интенсивности процесса ультразвуковой очистки от расстояния очищаемой поверхности распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 от излучателя.

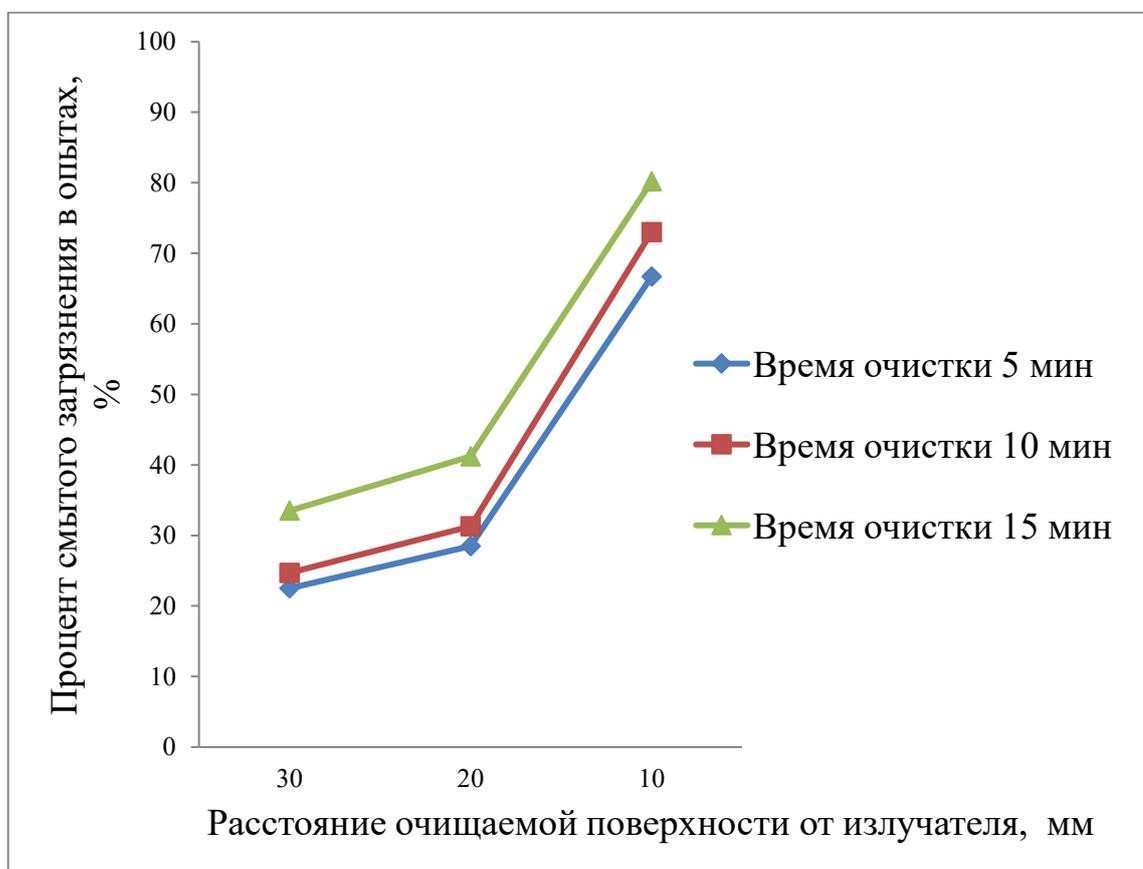


Рисунок 4.8 – Исследование влияния расстояния очищаемой поверхности от излучателя на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при различном времени процесса

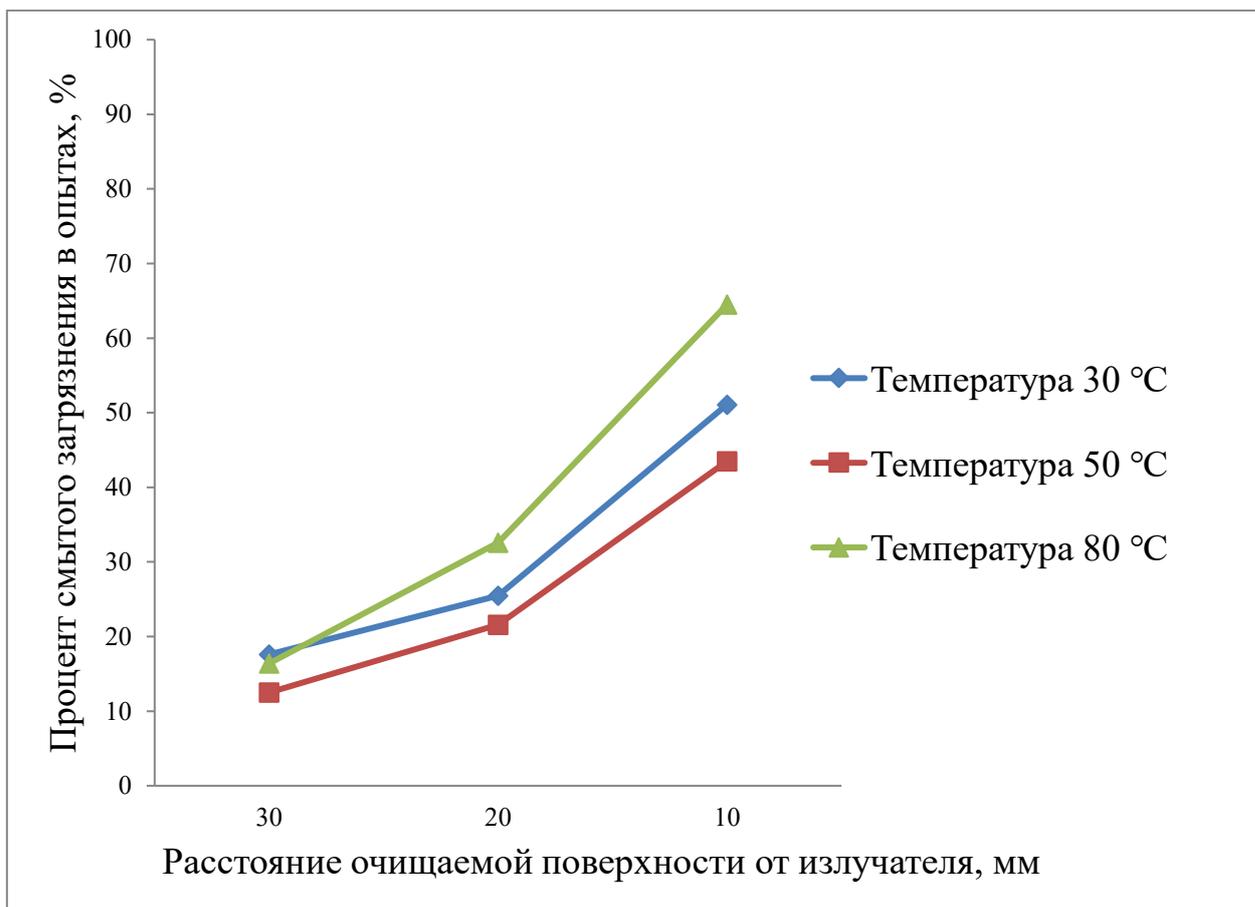


Рисунок 4.9 – Исследование влияния расстояния очищаемой поверхности от излучателя на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при различных температурных режимах

В рамках влияния исследования влияния фактора расстояния очищаемой поверхности от излучателя на качество очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при различных продолжительности и температуре наиболее рациональным процесс очистки будет при времени очистки 12 мин. при температуре 70 °С и минимальном расстоянии в 10 мм.

4.3 Исследование свойств моющего раствора при ультразвуковой очистке

В настоящее время для очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники используются различные виды моющих растворителей для удаления различных типов загрязнений с их поверхности [1].

Анализ рисунков 4.10 - 4.17 показал, что количество загрязнений на поверхности распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 существенно не влияет на степень качества очистки. Визуально было установлено, что в процессе очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 лабомидом наблюдается повышенное пенообразование при всем температурном диапазоне исследований. Поэтому при ультразвуковой очистке его использовать не целесообразно.

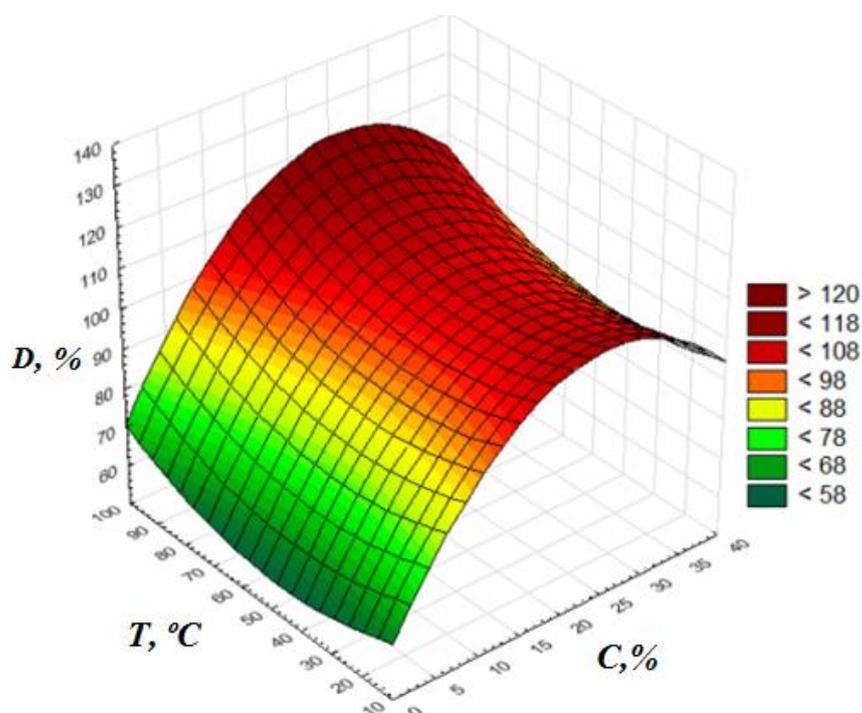


Рисунок 4.10 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 $D, \%$ от температуры раствора димера $T, ^\circ\text{C}$ и его концентрации $C, \%$

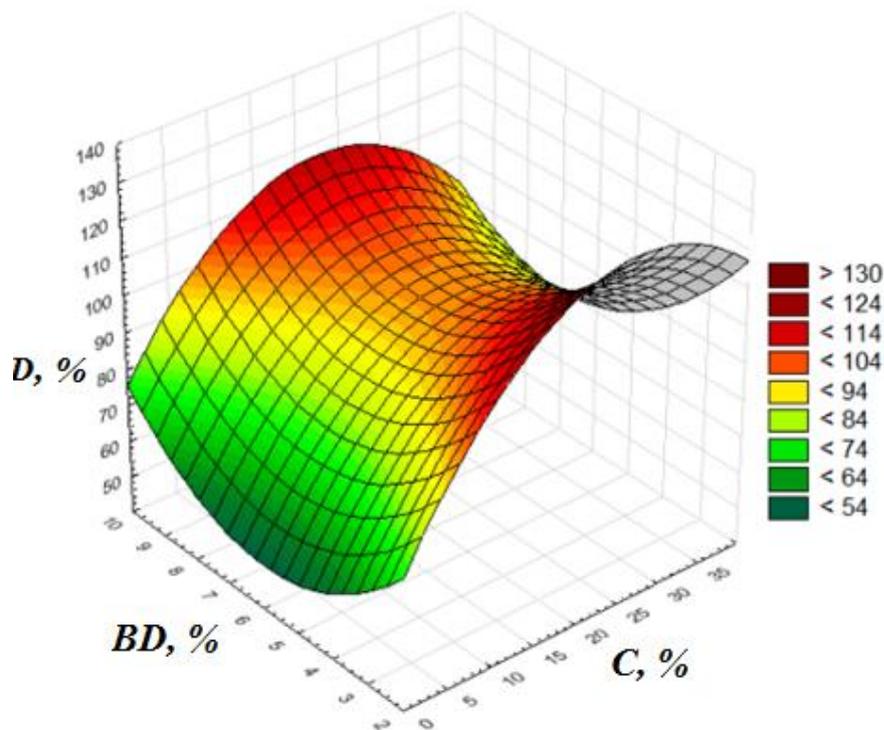


Рисунок 4.11 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 $D, \%$ от содержания загрязнений $BD, \%$ и концентрации раствора димера $C, \%$

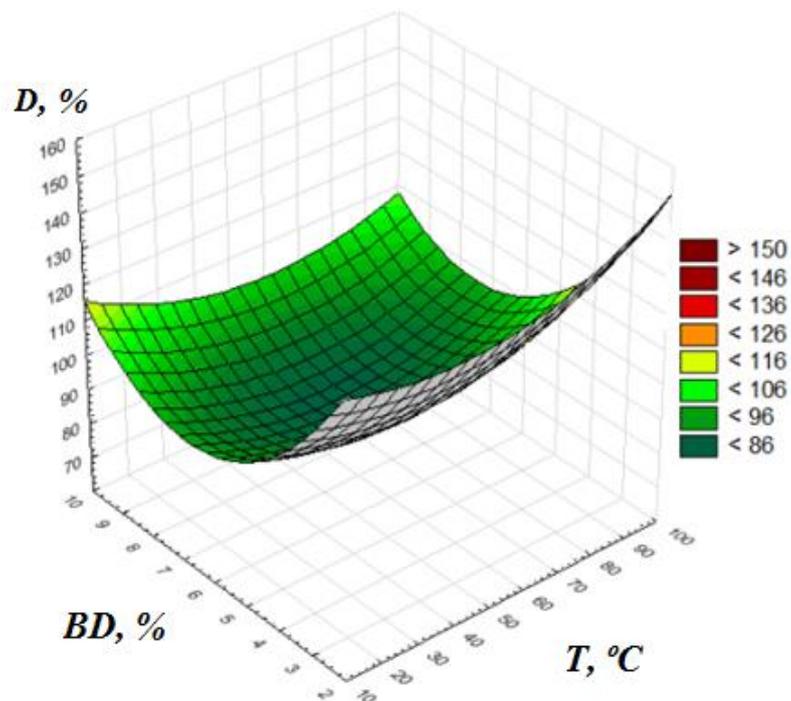


Рисунок 4.12 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 $D, \%$ от содержания загрязнений $BD, \%$ и температуры раствора димера $T, ^\circ C$

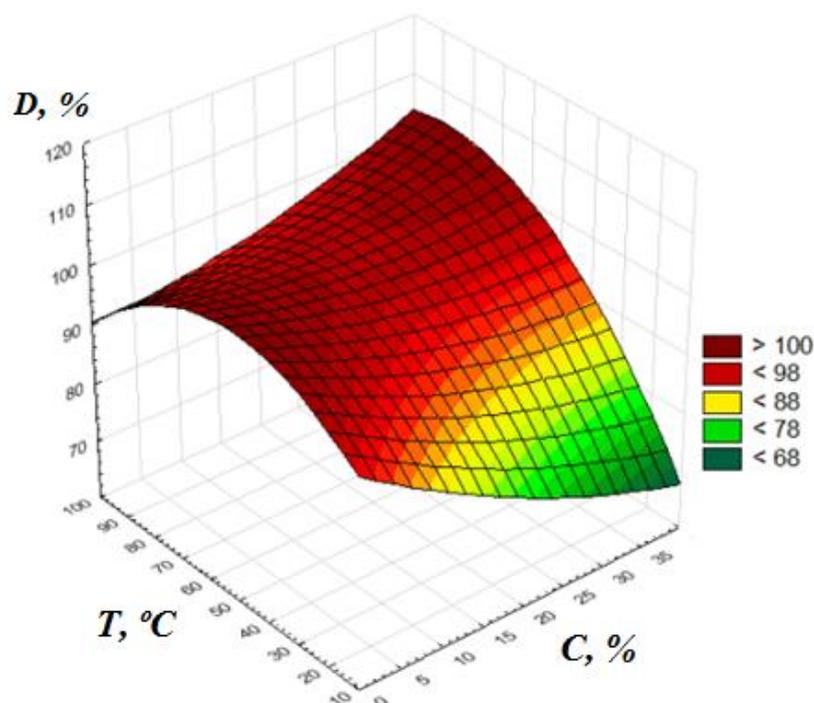


Рисунок 4.13 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 D , % от температуры раствора лабомида T , °C и его концентрации C , %

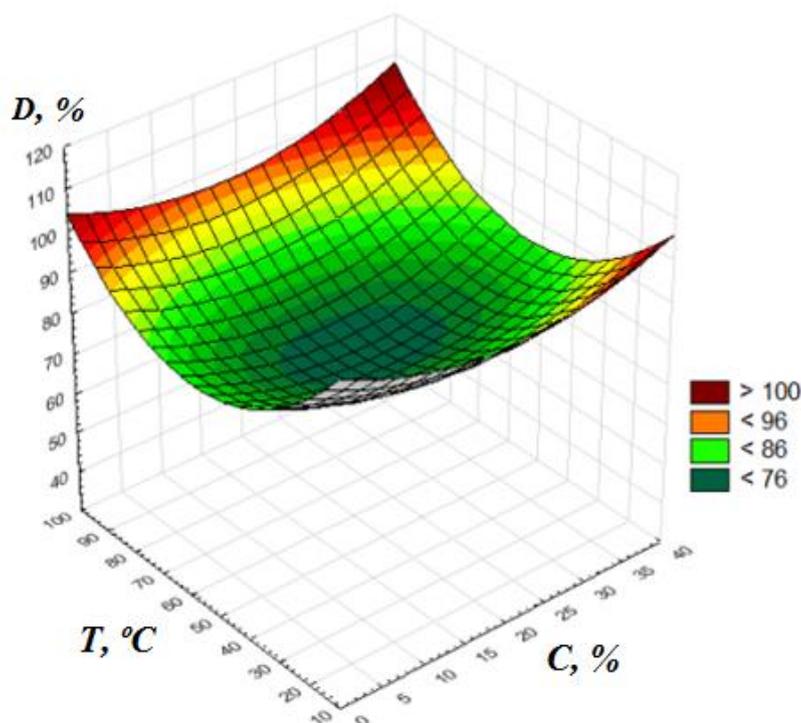


Рисунок 4.14 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 D , % от содержания загрязнений BD , % и концентрации раствора лабомида C , %

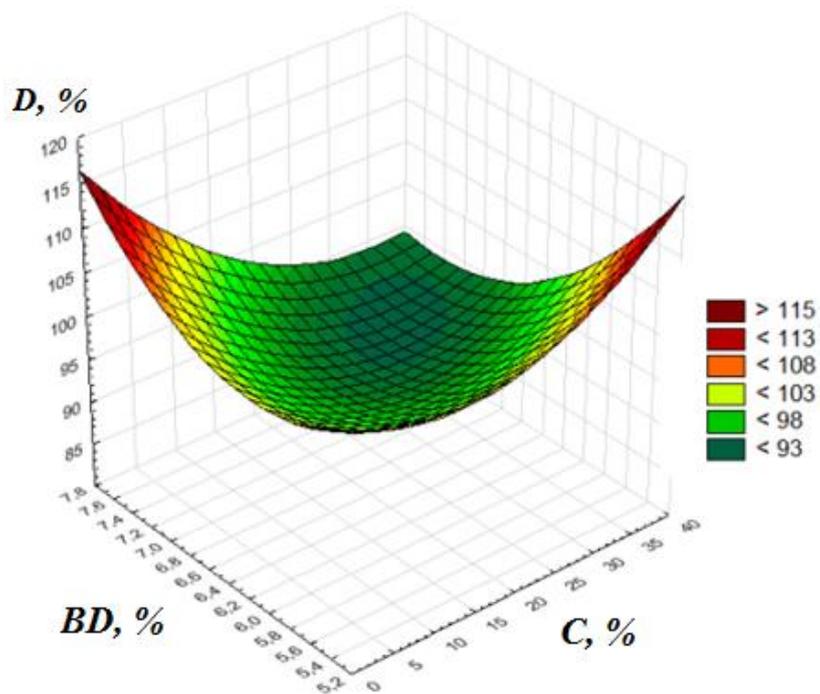


Рисунок 4.15 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 $D, \%$ от содержания загрязнений $BD, \%$ и температуры раствора лабомида $C, \%$

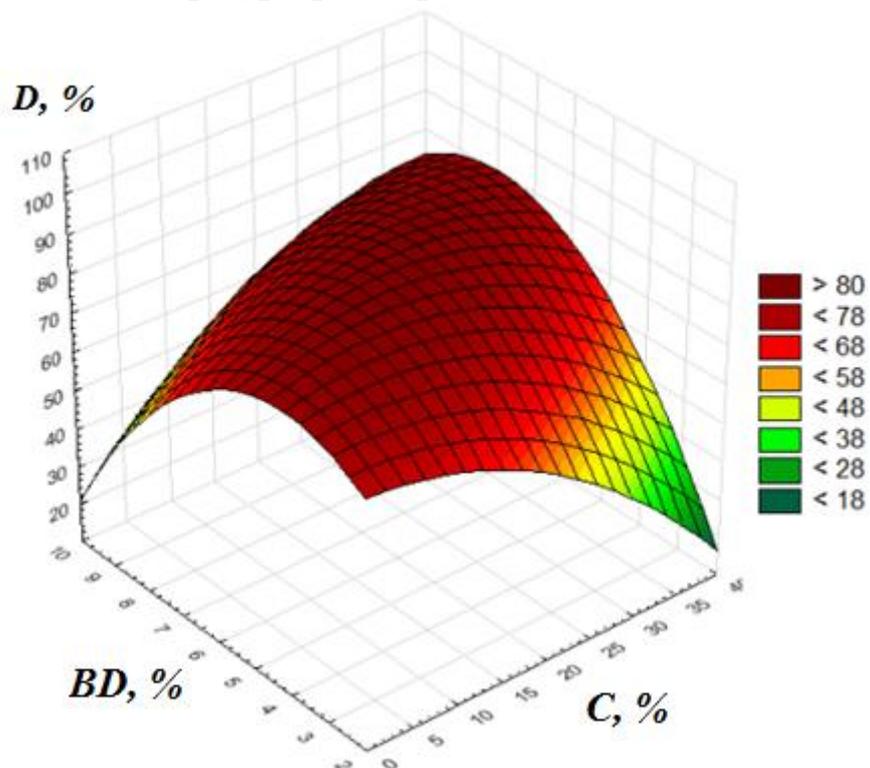


Рисунок 4.16 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 $D, \%$ от содержания загрязнений $BD, \%$ и концентрации раствора кальцинированной соды $C, \%$

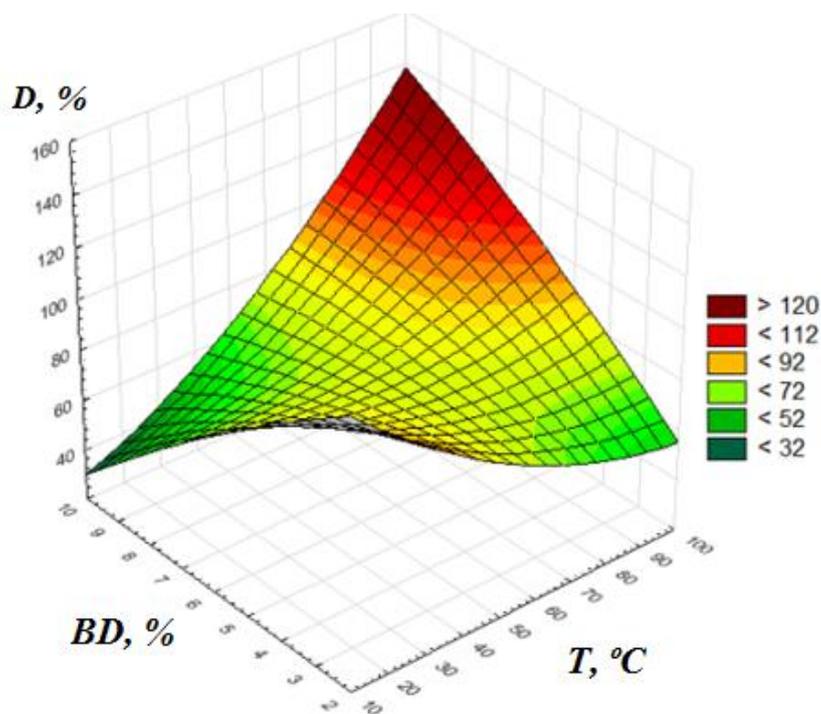


Рисунок 4.17 – Зависимость степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 D , % от содержания загрязнений на них BD , % и температуры раствора кальцинированной соды T , %

Выбранная математическая модель отражает связь между параметрами процесса, включенными в рассмотрение, и в общем виде представляется функцией многих переменных:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4.1)$$

Для построения математической модели приняты следующие обозначения:

Y – степень качества очистки;

X_1 – концентрация моющего средства;

X_2 – температура моющего раствора;

X_3 – содержание загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82;

X_4 – время очистки.

Стандартная модель включает в себя линейную и нелинейную комбинацию факторов. После оценки результатов экспериментальных

и расчетных данных по модели, мы установили, что целесообразно использовать нелинейную комбинацию факторов. Методом ортогонального центрального композиционного планирования получены математические модели степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 для моющего раствора на основе димера в зависимости от следующих параметров:

– от температуры раствора X_2 и его концентрации X_1 (рис. 4.3):

$$Y_1 = 68,0027 + 3,734X_1 - 0,4333X_2 - 0,0748X_1^2 + 0,0015X_1X_2 + 0,046X_2^2; \quad (4.2)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и концентрации раствора X_1 (рис. 4.4):

$$Y_2 = 105,8459 + 4,3553X_1 - 17,9067X_3 - 0,0793X_1^2 - 0,0754X_1X_3 + 1,4884X_3^2; \quad (4.3)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и температуры моющего раствора X_2 (рис. 4.5):

$$Y_3 = 184,7866 - 0,3901X_2 - 25,0267X_3 + 0,0056X_2^2 - 0,0305X_2X_3 + 1,8718X_3^2. \quad (4.4)$$

Получены математические модели степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 для моющего раствора на основе лабомида от следующих параметров:

– от температуры раствора X_2 и концентрации раствора X_1 описывается уравнением (рис. 4.6):

$$Y_4 = 90,1073 - 1,101X_1 + 0,5983X_2 + 0,0074X_1^2 + 0,0114X_1X_2 - 0,006X_2^2; \quad (4.5)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и концентрации раствора X_1 (рис. 4.7):

$$Y_5 = 280,4974 + 1,1099X_1 - 57,8101X_3 + 0,0176X_1^2 - 0,3034X_1X_3 + 4,7153X_3^2; \quad (4.6)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и температуры раствора X_2 (рис. 4.8):

$$Y_6 = 222,8166 - 0,0356X_2 - 36,2227X_3 - 0,0058X_2^2 + 0,1269X_2X_3 + 1,9937X_3^2 \quad (4.7)$$

Получены математические модели степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 для моющего раствора на основе кальцинированной соды:

– от температуры раствора X_2 и концентрации раствора X_1 описывается уравнением (рис. 4.9):

$$Y_7 = 120,535 - 1,0527X_1 - 1,2993X_2 + 0,023X_1^2 + 0,0018X_1X_2 + 0,0113X_2^2; \quad (4.8)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и концентрации раствора X_1 (рис. 4.10):

$$Y_8 = 52,1695 - 0,796X_2 + 14,3766X_3 - 0,0331X_2^2 + 0,3428X_2X_3 - 1,7508X_3^2; \quad (4.9)$$

– от содержания загрязнений распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и температуры раствора X_2 :

$$Y_9 = 163,5227 - 2,0081X_2 - 11,1875X_3 + 0,0066X_2^2 + 0,2485X_2X_3 - 0,2724X_3^2. \quad (4.10)$$

Анализ представленных моделей показал, что с увеличением концентрации раствора степень очистки возрастает, а достигнув определенной концентрации, дальнейшее ее увеличение существенного влияния на степень очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 не имеет.

Наиболее эффективной концентрацией для всех исследуемых моющих растворов является 150...200 г/л.

Наиболее эффективная температура для димера составляет 30...34 °С, лабомида – 60...70 °С, для раствора кальцинированной соды – 70...80 °С.

Результаты проведенных исследований представлены в виде откликов (рис. 4.3-4.10). Параметр X_4 (время очистки) в силу своей незначительности в формулах (4.1)–(4.9) отсутствует.

Это объясняется тем, что вследствие интенсификации процесса очистки ультразвуковыми колебаниями время очистки сокращается до минимума и

последующее время нахождения распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 в машине значительного влияния не оказывает.

4.4. Разработка технологического процесса очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники моющим средством в ультразвуковом поле

На сегодняшний день проведено большое количество исследований по тематике обеспечения очистки деталей с использованием ультразвуковых полей [35-43]. Очистке способствуют кавитационные пузыри, индуцированные высокочастотным давлением (звуковыми волнами), которые создают высокие силы действия на прилипающие к разным материалам загрязнители. Эффективность кавитационных пузырьков определяется амплитудой акустического давления, моментом времени, при котором начинается процесс захлопывания пузырьков, а также его продолжительностью. Изменяя соотношение между избыточным статистическим и звуковым давлениями, можно регулировать и наступление момента захлопывания пузырьков. В тоже время, образование кавитационных пузырьков при очистке детали является сложным процессом, на который влияет много факторов:

- температура моющего средства;
- концентрация моющего средства;
- состав моющего средства;
- форма и материал детали;
- мощность ультразвукового излучателя;
- состав загрязнителя;
- время очистки детали [42].

Вариации и комбинации этих факторов влияют на количество образовавшихся кавитационных пузырьков, а также на эффективность очистки деталей.

Анализ использования ультразвука для очистки деталей [36, 37] дает основания для поиска новых путей увеличения качества очистки этого процесса, а также вывод новых математических моделей для более точного описания с учетом воздействия разных факторов.

Предварительные исследования зарубежных исследований показали, что на процесс очистки наибольшее влияние оказывают температура моющего раствора, концентрация моющего вещества и время очистки детали [38, 39]. Также рассматривалось влияние температуры моющего раствора и частоты ультразвукового излучения на количество смытого загрязнения [40].

Однако на данный момент нет экспериментальных исследований, учитывающих влияние трех основных факторов (температуры моющего раствора, концентрации моющего вещества и продолжительности процесса) на очистку деталей в малогабаритных (5...10 л) ультразвуковых ваннах. Поэтому авторами исследовались именно эти факторы.

Параметры ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 менялись в зависимости от продолжительности процесса очистки, температуры моющего раствора и концентрации водного раствора моющих компонентов (табл. 4.2-4.3). Содержание компонентов моющего раствора составляла определенное его оптимальное значение - 150...200 г\л. Приготовленный моющий раствор использовали в процессе очистки 8 образцов, осуществляемой согласно плану эксперимента (табл. 4. 2) в три серии в случайном порядке [1, 7].

Таблица 4.2 – Факторы и уровни варьирования

Фактор	Обозначение	Уровень варьирования факторов			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Продолжительность процесса очистки, t , мин	x_1	5	10	15	5
Температура раствора, T , °C	x_2	40	60	80	20
Концентрация моющих веществ, p , г/л	x_3	5	15	25	10

Таблица 4.3 – План проведения опытов с кодированными значениями факторов

№ опыта	Фиктивная переменная	t , мин	T , °С	p , г/л
	x_0	x_1	x_2	x_3
1	+	+	-	-
2	+	-	-	-
3	+	+	+	-
4	+	-	+	-
5	+	+	-	+
6	+	-	-	+
7	+	+	+	+
8	+	-	+	+

Далее каждый распылитель топливной форсунки двигателя МТЗ-82 был высушен и взвешен. Таким образом, в каждом опыте был подсчитан процент смытого загрязнения (таблица 4.4 и таблица 4.5).

Таблица 4.4 – Реализация плана ПФЭ 2^3

№ опыта j	Матрица плана				Процент смытого загрязнения в опытах			Среднее значение y_j
	x_0	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	
1	+	+	-	-	28,5	31,3	41,2	33,7
2	+	-	-	-	17,6	12,5	16,4	15,5
3	+	+	+	-	51,1	43,5	64,5	53
4	+	-	+	-	22,5	24,7	33,5	27
5	+	+	-	+	25,5	21,6	32,6	26,5
6	+	-	-	+	20,4	14,6	17,9	17,6
7	+	+	+	+	66,7	73,9	80,2	73,6
8	+	-	+	+	48,4	50,1	61,2	53,2

Таблица 4.5 – Расширенная матрица плана ПФЭ 2^3

№ опыта	Матрица плана			x_0	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	y_j
	x_1	x_2	x_3						
1	+	-	-	+	-	-	+	+	33,7
2	-	-	-	+	+	+	+	-	15,5
3	+	+	-	+	+	-	-	-	53
4	-	+	-	+	-	+	-	+	27
5	+	-	+	+	-	+	-	-	26,5
6	-	-	+	+	+	-	-	+	17,6
7	+	+	+	+	+	+	+	+	73,6
8	-	+	+	+	-	-	+	-	53,2

Каждый опыт был повторен одинаковое количество раз. Воспроизводимость результатов проверена с помощью критерия Кохрена.

Результаты воспроизводятся, если критерий Кохрена при 5-процентном уровне значимости:

$$G_p = \frac{s_u^2 \text{Max}}{\sum_{u=1}^n \frac{2}{u}} \leq G_m(0,05; n; f_u) \quad (4.11)$$

Табличное значение критерия Кохрена при числе независимых оценок дисперсии $n = 8$ и числе степеней свободы каждой оценки $f_u = 2$ будет 0,516.

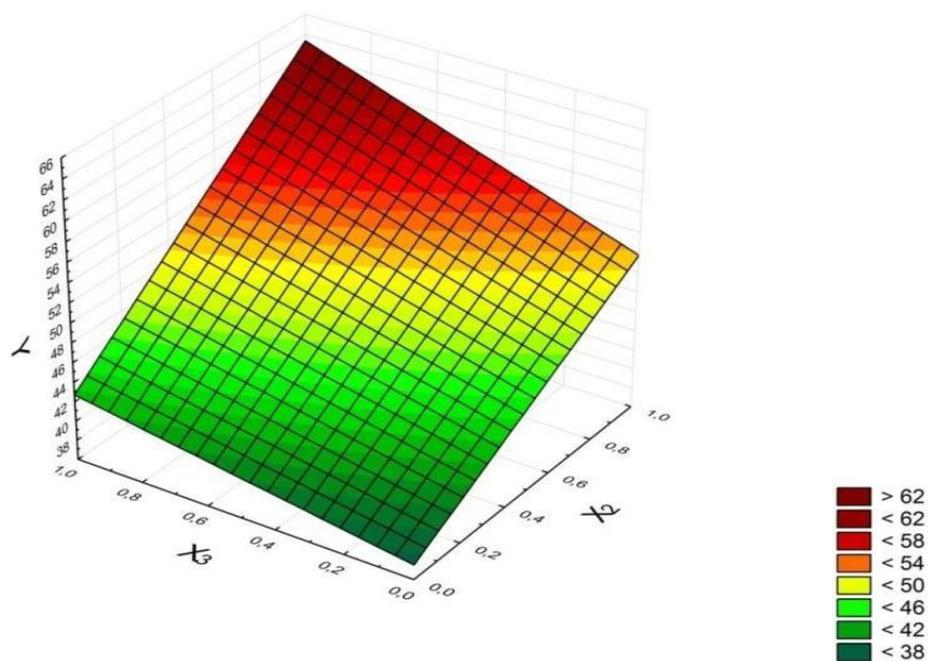
Расчетное значение:

$$G_p = \frac{113,1}{330,8} = 0,341.$$

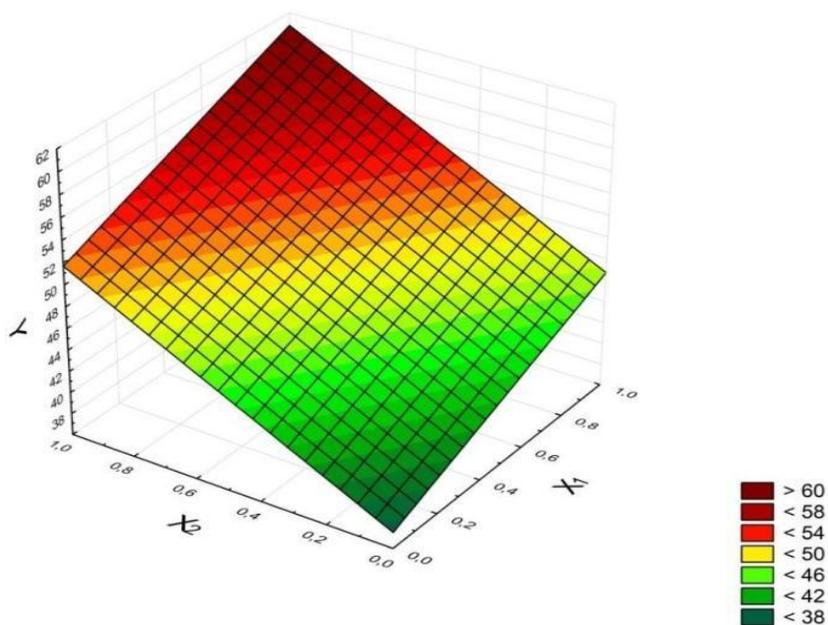
Расчетное значение критерия Кохрена меньше табличного из чего сделан вывод о воспроизводимости процесса.

Выведенные зависимости очень близки к линейным, при увеличении всех параметров увеличивается процент смыва загрязнителя с распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82.

На основе уравнения (4.14) были построены поверхности отклика, при этом учитывалось изменение только двух факторов, третий был равен нулю (рис. 4.18-4.19).



а



б

Рисунок 4.18 – Поверхности отклика процента смытого загрязнения с распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 зависимости от продолжительности процесса и температуры раствора (а), продолжительности процесса и концентрации моющих веществ (б)

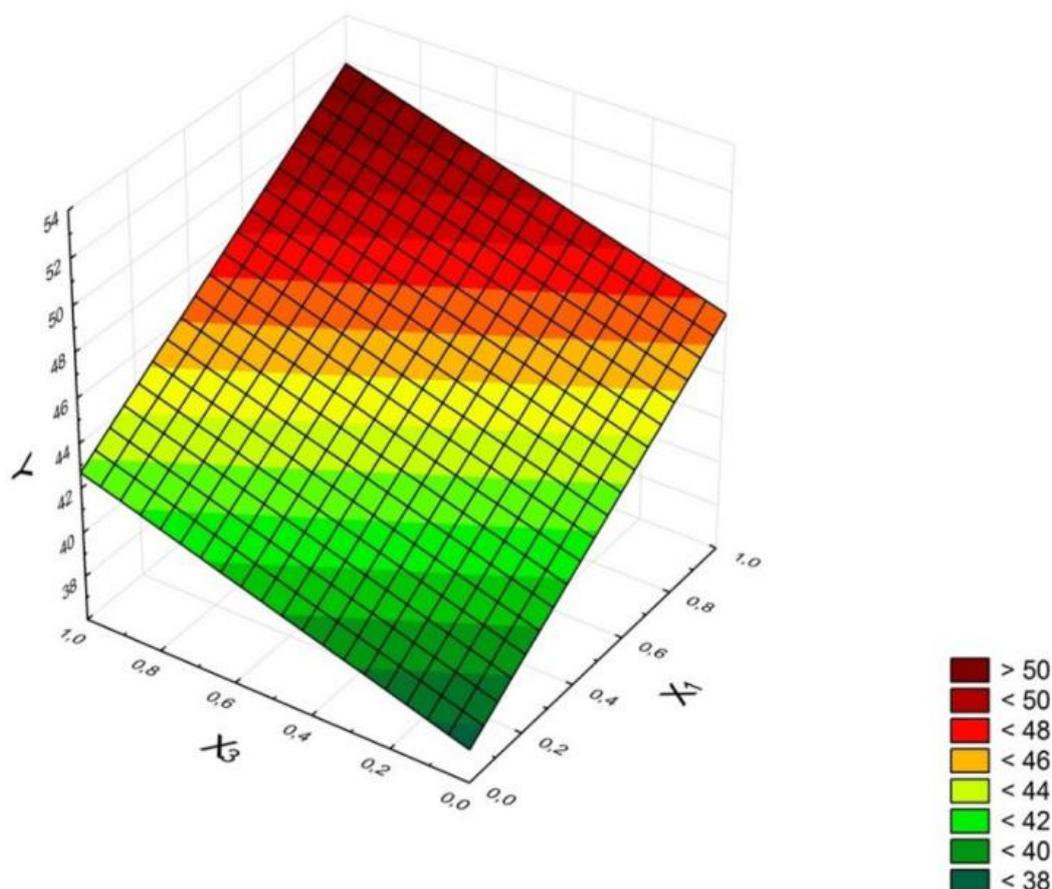


Рисунок 4.19 – Поверхности отклика процента смытого загрязнения с распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 зависимости от температуры раствора и концентрации моющих веществ

Воспроизводимость результатов эксперимента подтверждена с помощью критерия Кохрена. Значимость коэффициентов регрессии определена с помощью критерия Стьюдента. Модель подтверждена с помощью критерия Фишера. На основе уравнения регрессии построены поверхности отклика, в которых зависимости чрезвычайно близки к линейным. Сделан вывод о том, что при продолжительности процесса очистки 12 мин, температуре моющего раствора 70 °С и концентрации водного раствора моющих компонентов 200 г/л процент смытого загрязнения является максимальным.

4.5 Алгоритм выбора технологии и оборудования для ультразвуковой очистки деталей

В рамках научно-исследовательских работ была разработана комплексная технология ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники, сопровождаемая созданием специализированного технологического оборудования. Разработанная система технологического оснащения включает в себя следующие основные компоненты:

- резервуар для жидкого раствора объёмом 5 литров (рисунок 4.20)
Резервуар разработан под конкретный тип деталей – распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82;



Рисунок 4.20 – Резервуар для жидкого раствора объёмом 5 литров

- ультразвуковая установка «УЗДН-А». Большинство ультразвуковых генераторов принимают стандартный вход переменного тока с частотой 50 – 60 Гц, а затем превращают его в постоянный. Размеры варьируются от настольных блоков от 200 Вт до больших блоков мощностью 1000 Вт [33]. Преобразователи могут быть прикреплены к резервуару или может быть использован погружной преобразователь. Количество и положение таких преобразователей определяются размером и конфигурацией деталей, размером резервуара и т.п. В зависимости от вида загрязнений целесообразно использовать следующие значения интенсивности ультразвуковой установке УЗДН-А для распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82:

- до $1...3 \text{ Вт/см}^2$ – для легких загрязнений (масляных и жировых);
- от 3 до 10 Вт/см^2 – для средних загрязнений;
- более 10 Вт/см^2 – для сильных загрязнений (лаковых пленок, травильных шламов);
- до 100 Вт/см^2 – для очистки протяженных каналов малого диаметра.

Технология включает этапы очистки в ультразвуковой ванне:

1. Предварительная стадия очистки представляет собой важный технологический этап, обеспечивающий эффективность всего процесса обработки компонентов. В рамках данной операции осуществляется подготовка распылителя топливной форсунки двигателя модели МТЗ-82 к основной процедуре ультразвуковой очистки.

На данном этапе распылитель топливной форсунки помещают в нагретый моющий раствор, димера с концентрацией 150 г/л удаляющий всю химически растворимую грязь и общие загрязнения. Время предварительного этапа замачивания распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 – 5 мин., температура замачивания – 20 °С.

2. Основной технологический этап очистки базируется на процессе кавитационной обработки детали в моющем растворе с использованием ультразвукового воздействия. Данный метод обеспечивает

высокоэффективное удаление загрязнений за счёт создания кавитационных эффектов в рабочей среде.

Режим основного этапа ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки включает следующие параметры: концентрацию моющих средств 15...20%; рабочие температуры для димера 30...40 °С, для лабомида 60...70 °С, для кальцинированной соды 70...80 °С; время очистки – 5 минут.

3. Заключительный этап технологического процесса представляет собой процедуру посточистки, которая выполняется после завершения основного этапа ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки. Данный этап предусматривает проведение дополнительной ультразвуковой обработки уже очищенной детали в водной среде без применения химических реагентов. Целью посточистки является обеспечение максимально эффективной очистки поверхности детали за счёт удаления остаточных загрязнений и микрочастиц, которые могли остаться после основной обработки. Время посточистки в воде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 после основного этапа – 5 мин, температура– 20 °С.

4.6 Результаты исследования натуральных испытаний

На основании проведенных исследований и полученных результатов лабораторных исследований разрабатывался процесс очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 в рамках натуральных исследований в деятельности НИЦИАМТ ФГУП НАМИ (Московская область). На рисунке 4.21 представлены детали сельскохозяйственной техники трактора МТЗ в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, которые поддавались процессу очистки.



Рисунок 4.21 – Детали сельскохозяйственной техники трактора МТЗ в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82

В таблице 4.6 показаны различные параметры процесса очистки на ультразвуковой установке УЗДН-А с постоянной частотой колебаний, такие как температура, загрязнение и время очистки компонентов. Эти данные фиксировались ежедневно, когда проводились эксперименты. Каждый день семь единиц деталей двигателей сельскохозяйственной техники трактора МТЗ в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 были очищены на ультразвуковой установке УЗДН-А с постоянной частотой колебаний.

Таблица 4.6 – Параметры проведения натуральных испытаний очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82

Дата	Температура, °С				Начальная концентрация загрязнений мг/100мл	Время очистки, мин				Конечная концентрация загрязнений мг/100мл
	I	II	III	IV		I	II	III	IV	
12.08.2023	66	66	66	70	21,2	6	5	5	5	2,8
13.08.2023	66	67	66	70	25,6	5	6	5	6	3,4
14.08.2023	66	67	66	70	28,2	6	5	5	5	3,7
15.08.2023	67	66	66	70	32,2	5	5	4	5	4,3
16.08.2023	66	66	67	70	36,2	6	5	6	5	4,8
17.08.2023	67	67	66	70	36,8	5	5	4	5	4,9
18.08.2023	66	66	67	70	38,4	6	5	6	5	5,1

Методика расчета эффективности очистки:

- Определение средней начальной концентрации загрязнений:

$C_{нач} = 30,4$ мг/100мл;

Расчет средней конечной концентрации:

$C_{кон} = 4,11$ мг/100мл;

- Формула для определения степени очистки:

$$\eta = \frac{C_{нач} - C_{кон}}{C_{нач}} \cdot 100\%$$

Подстановка значений:

$$\eta = \frac{30,4 - 4,11}{30,4} \cdot 100\% = 86,5\%$$

Анализ результатов проведения натуральных испытаний по очистке распылителя топливной форсунки двигателя модели МТЗ-82 (согласно данным таблицы 4.7) демонстрирует, что для всех исследуемых компонентов зафиксирован показатель степени очистки, превышающий 86% (рисунок 4.23).



Рисунок 4.23 – Детали сельскохозяйственной техники трактора МТЗ в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 после процесса очистки по технологии ультразвуковой очистки

Таким образом, опытно-производственная проверка и внедрение разработанного технологического процесса показала эффективность разработанной технологии очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 на специализированных предприятиях по ремонту деталей двигателей сельскохозяйственной техники.

4.7 Выводы по главе

Во многих отраслях промышленности все более широкое применение находят ультразвуковые технологические процессы, в которых используются многофазные среды. Установлено, что главный интерес для практики создания ультразвуковых машин очистки загрязнений деталей в обслуживании сельскохозяйственной техники представляет установление вида зависимостей между основными технологическими параметрами ультразвуковой очистки (время очистки, температура моющего средства, концентрацию водного раствора моющих компонентов и качеством очистки). Было определено, что при разработке технологических процессов очистки следует учитывать свойства загрязнений:

- их физическое состояние (твердое или жидкостное, вязкость жидкостных и температура плавления твердых загрязнений);
- связь загрязнений с поверхностью изделия (полярная или неполярная);
- полимеризацию компонентов загрязнений, имеющих место при работе изделий в условиях высоких температур;
- присутствие твердых и мягких частиц, заполняющих пазы, глухие и сквозные отверстия;
- конгломерация продуктов коррозии и окисление с загрязнениями.

С целью выявления наиболее важных факторов интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах проведен эксперимент, учитывающий три фактора: время очистки, температуру моющего средства, концентрацию водного раствора моющих компонентов. Критерием эффективности выбран процент смытого загрязнения. В рамках проведения серии опытов были получены результаты влияния расстояния очищаемой поверхности от излучателя на уровень очистки от загрязнений деталей при различных продолжительности и температуре очистки. Сделан

вывод о том, что при продолжительности процесса очистки 12 мин, температуре моющего раствора 70 °С и расстоянии очищаемой поверхности от излучателя на уровне 10 мм процент смытого загрязнения максимален.

Был проведен эксперимент процесса очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 от загрязнений в погружных моечных машинах с применением ультразвуковых колебаний. Для интенсификации процесса очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 от загрязнений были определены конкретные концентрации димера, лабомида и кальцинированной соды. Для интенсификации процесса очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 использовалась ультразвуковая установка УЗДН-А с постоянной частотой колебаний. Степень очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 оценивалась отношением массы загрязнителя, удаленного с ее поверхности, к его начальной массе, в процентах. Полученные математические модели степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 (для марок конструкционных углеродистых сталей и цветных металлов) от загрязнений, позволили определить наиболее эффективные технологические параметры интенсификации процесса очистки: концентрация моющих растворов 150...200 г/л; рабочая температура для димера 30...40 °С, для лабомида 60...70 °С, для кальцинированной соды 70...80 °С. Установлено, что наиболее энергоэффективным и безопасным моющим раствором является димер, а применение лабомида при ультразвуковой очистке не целесообразно вследствие его повышенного пенообразования. Также установлено, что время нахождения распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 в машине и количество загрязнений на поверхности существенно не влияют на степень очистки.

Наиболее энергоэффективным и безопасным моющим раствором является димер. При ультразвуковой очистке использование лабомида не целесообразно вследствие его повышенного пенообразования.

На процесс очистки детали в ультразвуковой ванне наибольшее влияние оказывает температура раствора и продолжительность процесса очистки.

Опытно-производственная проверка и внедрение разработанного технологического процесса показала эффективность разработанной технологии очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 на специализированных предприятиях по ремонту деталей двигателей сельскохозяйственной техники: для всех исследуемых деталей обеспечивается степень качества очистки свыше 86 %.

ГЛАВА 5 ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено сравнительное исследование двух групп тракторов модели МТЗ-82 с применением различных технологических режимов и составов моющих растворов в рамках процесса ультразвуковой очистки деталей двигателей. Контрольный эксперимент осуществлялся по традиционной технологии в моечной установке АМ1400 АК при температуре 30 °С, концентрации каустической соды 10% и продолжительности процесса 10 минут. Экспериментальная группа подвергалась очистке по разработанной технологии интенсификации процесса (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Варианты исследований тракторов МТЗ-82 в соответствии с технологическими режимами и составом растворов технологического процесса ультразвуковой очистки деталей их двигателей

№ вариантов	Режим очистки
1	Традиционная очистка деталей в моечной машине АМ1400 АК: при температуре очистки 30 °С, концентрации каустической соды 10% и времени 10 мин.
2	Разработанный технологический процесс ультразвуковой очистки деталей

В ходе экспериментальных исследований производилась оценка межремонтного ресурса двигателей исследуемых групп тракторов с учётом различных режимов очистки их компонентов. Статистический анализ полученных данных, характеризующийся коэффициентами вариации, не превышающими 0,34, свидетельствует о соответствии всех экспериментальных результатов нормальному закону распределения.

Данные таблицы 5.2 показывают, что при очистке деталей по разработанному технологическому процессу ультразвуковой очистки деталей получены результаты, намного превосходящие результаты очистки согласно традиционной технологии в погружных машинах.

Таблица 5.2 – Сводная таблица результатов производственных испытаний

№ № п/п	Режим очистки	Средний ресурс отремонтированных двигателей, по степени изношенности агрегата. г, мото-ч.	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
1	Традиционная погружная очистка деталей в моечной машине АМ1400 АК	4043	442,4	0,11 (11%)
2	Разработанный технологический процесс ультразвуковой очистки деталей	4932,2	211,2	0,056 (5,6%)

Вместе с улучшением качества очистки деталей по технологическому процессу ультразвуковой очистки деталей повышает и противокоррозионную стойкость деталей, которое способствует увеличению межремонтного ресурса двигателей.

Расчет экономического эффекта Э от внедрения и использования новых средств труда долговременного применения по сравнению с заменяемыми (машины, оборудование, приборы и т.д.) с улучшенными качественными характеристиками (производительность, долговечность, издержки эксплуатации и т.д.) производится по формуле, согласно методике из [2]:

$$\mathcal{E} = \left(Z_1 \frac{B_2}{B_1} \beta + \mathcal{E}_c - Z_2 \right) A_2 \quad (5.1)$$

где Z_1 и Z_2 – затраты на изготовление единицы соответственно базового (стандартная погружная ванна) и нового оборудования для очистки деталей (внедряемое оборудование согласно технологи интенсификации), руб.;

A_2 – годовой объем производства услуг очистки деталей, предназначенных для использования в расчетном году, в натуральных единицах;

V_1 и V_2 – годовые объемы сельскохозяйственных работ тракторами МТЗ, производимых при использовании оборудования очистки деталей по сравниваемым вариантам, в натуральных единицах;

β – коэффициент учета изменения сроков службы нового оборудования очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 в сравнении с базовым.

\mathcal{E}_c – экономия в производстве на затратах по эксплуатации оборудования очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, руб.

Таким образом, учитывая, что стоимость нового устройства по ультразвуковой очистке на 115% выше стоимости базового применяемого оборудования, а годовой объем работ будет составлять на 250% выше базового, при использовании 500 раз в год, при постоянных сроках службы оборудования.

За счет проведения работ по очистке распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 ультразвуком обеспечивается экономия в размере 500 000 руб. Базовая стоимость комплектации оценивается в 205 000 руб.

Годовая эффективность предлагаемого устройства составит:

$$\mathcal{E} = (205\,000 \cdot 250 \cdot 1,1 + 500\,000 - 205\,000 \cdot 115) \cdot 500 = 16\,650\,000 \text{ руб.}$$

5.1 Выводы по главе

В результате проведения производственных испытаний разработанного технологического процесса интенсификации ультразвуковой очистки деталей получены результаты, намного превосходящие результаты очистки согласно традиционной технологии в погружных машинах.

Рассчитанная годовая эффективность разработанной технологии интенсификации ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30, 50 и 70 °С составляет 16 650 000 руб., что позволяет утверждать об уместности его использования в промышленных масштабах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ показал, что на качество ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, оказывают влияние следующие факторы: время очистки ультразвуком 12 минут, расстояние до излучателя ультразвука 10 мм, температура моющего раствора 70 °С, концентрация моющего средства 15...20 % или 150...200 г/л

2. Определены оптимальные, по критерию – максимальный процент смытого загрязнения для распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, параметры технологического процесса: температуры раствора - 70 °С, однако если же использовать в ультразвуковой ванне органические растворители, то максимальное очищающее действие проявляется при более низких температурах и зависит от вида растворителя, упругости его паров и растворимости загрязнений в нем, продолжительность процесса очистки 12 минут, расстоянии очищаемой поверхности от излучателя на уровне 10 мм.

3. Полученные математические модели степени очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, позволили определить наиболее эффективные технологические параметры: концентрация моющих растворов 15...20%; рабочая температура для димера 20...30 °С, для лабомида 70...80 °С, для кальцинированной соды 80...90 °С.

Установлено, что наиболее энергоэффективным и безопасным моющим раствором является димер, а применение лабомида при ультразвуковой очистке не целесообразно вследствие его повышенного пенообразования.

4. В результате проведения натурных испытаний при оптимальных параметрах технологического процесса (температура 66–70°С, время обработки 4–6 минут) достигнута степень очистки распылителя топливной форсунки свыше 86%, что подтверждается снижением концентрации загрязнений с начальной величины 30,4 мг/100 мл до конечной 4,11 мг/100 мл (относительная погрешность измерения +/- 5%), стабильность результатов

подтверждена семидневными испытаниями с ежедневной обработкой семи единиц деталей.

5. Проведенная оценка технико-экономической эффективности разработанной технологии ультразвуковой очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 показала, что при базовой стоимости комплекта оборудования 205 000 рублей годовая экономия составляет 500 000 рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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. - 128 с.
3. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства // Вестник евразийской науки. 2013. №3 (16). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-ultrazvukovoy-ochistki-detaley-v-usloviyah-osnovnogo-i-remontnogo-proizvodstva> (дата обращения: 08.07.2025).
4. Шистеев А.В. Разработка стенда ультразвуковой очистки деталей двигателей внутреннего сгорания // Эпоха науки. 2023. №33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-stenda-ultrazvukovoy-ochistki-detaley-dvigatelay-vnutrennego-sgoraniya> (дата обращения: 08.07.2025).
5. Толочко Н. К., Челединов А. Н., Ланин В. Л. Закономерности распределения активности кавитации в ультразвуковой ванне // Доклады БГУИР. 2018. №3 (113). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zakonomernosti-raspredeleniya-aktivnosti-kavitatsii-v-ultrazvukovoy-vanne> (дата обращения: 08.07.2025).
6. Козлов, Ю.С. Очистка автомобилей при ремонте / Ю.С. Козлов. - М.: Транспорт, 1975. -216с.9
7. Черноиванов, В. И. Очистка и мойка машин и оборудования / В.И. Черноиванов, В.Н. Лосев, А.Л. Быстрицкая. - М.: ГОСНИТИ, 1998. - 99 с.
8. Фадеев, И.В. Новые моющие средства для узлов и агрегатов автотранспортных средств / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов //

Автотранспортное предприятие. - 2014. - № 6. - С. 54-56.

9. Тельнов, А.Ф. Моющие средства, их использование в машиностроении и регенерация / А. Ф. Тельнов, Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, И.А. Тулаев. - М.: «Машиностроение», 1993. - 202 с.

10. Малышев, А.В. Контроль загрязнений в современных системах машин / Малышев А.В. // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. - 2014. - № 3. - С. 49-52.

11. Фадеев, И.В. Моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств для узлов и деталей в присутствии некоторых боратов / И.В. Фадеев, А.Н. Ременцов, Ш.В. Садетдинов // Грузовик. - 2017. - № 1. - С. 17-20.

12. Тойгамбаев, С.К. Совершенствование процессов очистки деталей от загрязнений при ремонте машин / С.К. Тойгамбаев // Актуальные проблемы современной науки. - 2016. - № 3 (88). - С. 217-221.

13. Козлов, Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю.С. Козлов, О.К. Кузнецов, Н.Ф. Тельнов. - М.: Машиностроение, 1982. - 264 с

14. Бышов, Н.В. Повышение противокоррозионных свойств растворов синтетических моющих средств для мойки деталей [Текст] / Н.В. Бышов, И.В. Фадеев, Г.А. Александрова, Ш.В. Садетдинов // Известия Международной академии аграрного образования. - 2019. - № 45. - С. 20-24.

15. Фадеев, И.В. Влияние моноборатов лития, натрия, калия на моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств [Текст] / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов // Приволжский научный журнал. - 2015. - №2. - С. 86-90.

16. Лебединский, К.В. Ресурсосберегающий метод очистки машиностроительной продукции от углеводородсодержащих производственных загрязнений / К.В. Лебединский, Н.Е. Курносов // Экологические проблемы современности. Пенза. - 2011. - С. 61 - 65.

17. Фадеев, И.В. Повышение противокоррозионных качеств моющих

средств с применением амидоборатных соединений на автомобильном транспорте / И.В. Фадеев, А.Н. Ременцов, Ш.В. Садетдинов // Грузовик. - 2015. - № 4. - С. 13 - 16.

18. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Грилихес; под ред. П.М. Вячеславова. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. - 101 с.

19. Тельнов, Н.Ф. О механизме накипеобразования. Доклады МИИСП / Н.Ф. Тельнов, В.П. Мороз, Н.А. Очковский. - М.: Изд-во МИИСП. - 1971.

20. Тельнов, Н.Ф. Предупреждение отложений накипи и снижение коррозии в системе охлаждения дизелей / Н.Ф. Тельнов, Е.Ф. Тебенихин, В.П. Мороз, Н.А. Очковский. // Тракторы и сельхозмашины, 1969. - №7.

21. Козлов, Ю.С. Допустимая загрязненность поверхности деталей / Ю.С. Козлов // Автомобильный транспорт. - 1974. - № 11. - С. 33 - 35.

22. Фадеев, И.В. Повышение противокоррозионных качеств моющих средств с применением амидоборатных соединений на автомобильном транспорте / И.В. Фадеев, А.Н. Ременцов, Ш.В. Садетдинов // Грузовик. - 2015. - №.4 - С. 15-17.

23. Факторы неравномерной очистки деталей машин в ультразвуковых ваннах / Н.К. Толочко [и др.] // Вест. машиностроения. 2017. № 4. С. 82-85.

24. Быков, В.В. Повышение эффективности мойки деталей при ремонте автомобилей / В.В. Быков, Б.П. Загмородских, Ш.В. Садетдинов, В.М. Юдин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. - 2019. - № 1(53). - С. 358363.

25. Lanin V.L., Tomal V.S. Increase ultrasonic cleaning efficiency of electronics modules // Engineering. 2013. № 5. P. 191-195.

26. Бышов, Н.В. К вопросу улучшения свойств синтетических моющих средств для мойки деталей мобильной техники / Н.В. Бышов, И.В. Фадеев // Наука, производство ийской науч.-практич. конференции. - Чебоксары: ЧГПУ им. И.Я. Яковлева, 2019. - С. 23-29.

27. Бышов, Н.В. Повышение противокоррозионных свойств растворов синтетических моющих средств для мойки деталей / Н.В. Бышов, И.В. Фадеев, Г.А. Александрова, Ш.В. Садетдинов // Известия Международной академии аграрного образования. - 2019. - № 45. - С. 20-24.

28. Бышов, Н.В. Ингибитор коррозии для растворов синтетических технологических средств / Н.В. Бышов, И.В. Фадеев // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы Всероссийской науч.-практич. конференции. - Чебоксары: ЧГСХА, 2019. - С. 411-417.

29. Быков, В.В. Влияние температуры растворов синтетических моющих средств на их моющую способность / В.В. Быков, Б.П. Загородских, А. Н. Ременцов, В.М. Юдин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. - 2019. - № 1(53). - С. 249-255.

30. 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.

31. Drelich, J. Guidelines to measurements of reproducible contact angles using a sessile-drop technique [Текст]/ J. Drelich // Surface Innovations. - 2013. - № 1. - P. 248-254.

32. Goebel, M.O. Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid-liquid interfacial properties [Текст] / M.O. Goebel, S.K. Woche, J. Bachmann // Journal of Hydrology. - 2012. - Vol. 442. - P. 63-74.

33. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements [Текст] / T. Huhtamaki, X. Tian, J. Korhonen at al // Nature Protocols. - 2018. - Vol. 13. - P. 1521-1538.

34. Volpe, D. The Wilhelmy method: a critical and practical review [Текст] /

D. Volpe, S. Siboni // Surface Innovations. - 2018. - № 6. - P. 120-132.

35. Verhaagen B., Rivas D.F. Measuring cavitation and its cleaning effect. Ultrasonics Sonochemistry. 2016;29:619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>

36. Vetrinmurugan, Mike Goodson, Terry Lim, Samiheta, Nagarajan, J. Siddharth. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components. International Journal of Chemical Engineering and Applications. 2013;4(4):174-177. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.288>

37. Weller R.N., Brady J.M., Bernier W.E. Efficacy of ultrasonic cleaning. Journal of Endodontics. 1980;6(9):740-743. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(80\)80185-3](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(80)80185-3)

38. Hicks Ch.R., Turner K.V. Fundamental concepts in the design of experiments. Oxford University Press, 1999. 576 p.

39. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 3 (16). С. 69.

40. Майоров А.В., Михеева Д.А. Сравнительный анализ режимов мойки жестяных банок в моечных машинах струйного и погружного типов // Вестник Марийского государственного университета. 2014. №1 (13). С.48-53.

41. Fuchs F.J. Ultrasonic cleaning: Fundamental theory and application. 1995. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950025362> (Last accessed: 09.06.2022).

42. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. Ultrasonics Sonochemistry. 2016; 29: 519-523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>

43. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. №1 (127). 101. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.24>.

44. Петрик Д.Ю., Корнеев В.М., Петрик В.Ю. Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 5. С. 73-77. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-73-77>.

45. Калачев Ю.Н., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М. Применение ультра-звука в условиях эксплуатации автотракторных средств // Ультразвуковые технологические процессы-98: Тез. докл. науч.-техн. конф.М.: МАДИ (ТУ), 1998. С. 45-48.

46. Голых Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: дис. канд. тех. наук: 05.17.08. Барнаул, 2014.

47. Майоров А.В. Влияние факторов очистки на качество промывки консервных банок в моечной машине погружного типа // Инновации и инвестиции. 2018. №5. С.250-253.

48. Майоров А.В., Яйцева Н.Э. Анализ воздействия струй на очищаемый объект // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. №5-1. С. 217-219.

49. Корнеев В.М., Глазов В.А., Песня Ю.П. Способы интенсификации процессов очистки в погружных машинах. Техника и технологии: теория и практика. 2022. № 1 (3). С. 20-26.

50. Федоров А.А., Кабанов Н.В. Разработка технологии и оборудования для промывки трубопроводов гидротопливных систем самолета с использованием ультразвука // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №4-4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-tehnologii-i-oborudovaniya-dlya-promyvki-truboprovodov-gidroito-plivnyh-sistem-samoleta-s-ispolzovaniem-ultrazvuka> (дата обращения: 09.07.2025).

51. Фадеев, И.В. Повышение противокоррозионных свойств технических моющих средств с применением амидоборатных соединений [Текст]/ И.В. Фадеев, А.Н. Ременцов, Ш.В. Садетдинов // Грузовик. - 2015. -

№4. - С. 13-16.

52. Фадеев, И.В. Разработка синтетических моющих средств на основе боратов для очистки поверхности металлов [Текст]: монография / И.В. Фадеев, Ш.В. Садетдинов, И.Е. Илларионов; под общ. ред. И.Е. Илларионова. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. гос. ун-та, 2016. - 185с.

53. Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces-toward the understanding and control of wettability for different applications / K. Grundke et al. // *Advances in Colloid and Interface Science*. - 2015. - №. 222. - P. 350-376.

54. Reliable measurement of the receding contact angle / J. Korhonen, T. Nuhtamaki, O. Ikkala at al // *Langmuir*. - 2013. - № 29. - P. 3858-3863.

55. Агранат, Б.А. Ультразвуковая очистка / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский // *Физические основы ультразвуковой технологии*. – М., 1970. – С. 165–253.

56. Агранат, Б.А. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат. –М.: Металлургия, 1974. – С. 239–254.

57. Афанасиков, Ю.И. Проектирование моечно-очистного оборудования авторемонтных предприятий / Ю.И. Афанасиков. – М.: Транспорт, 1987. – 174 с.

58. Иванова, Т.Н. Из опыта разработки технологии и оборудования для ультразвуковой высокоамплитудной очистки / Т.Н. Иванова, В.М. Приходько, А.П. Панов // *Оптимизация и интенсификация технологических процессов в приборостроении: тез. докл. науч.-техн. конф.* – М.: МИНХ, 1978. – С. 18.

59. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 151 с.

60. Панов, А.П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей / А.П. Панов. – М.: Машиностроение, 1984. – 88 с.

61. Папок, К.К. Нагары, лаковые отложения и осадки в автомобильных двигателях / К.К. Папок, А.Б. Виппер. – М.: Машгиз, 1956. – 156 с.

62. Приходько, В.М. Опыт внедрения технологий и оборудования для ультразвуковой очистки в основном и ремонтном производстве / В.М. Приходько, Б.А. Кудряшов, И.В. Багров // Международная научно-техническая конференция «Ультразвук в технологии машиностроения –91». – Архангельск: Севмашвуз, 1991. – С. 229–232.

63. Приходько, В.М. Применение ультразвуковых колебаний для совершенствования разборочно-моечных операций при ремонте топливной аппаратуры автотракторных двигателей / В.М. Приходько // Совершенствование технической эксплуатации автомобилей: сб. науч. тр. – М.: МАДИ, 1986. – С. 61–66.

64. Латышенко М.Б., Шемякин А.В., Тараканова Н.М., Конов И.В. Теоретическое обоснование конструкции универсального моечного устройства абразивно-кавитационного действия // Глобальная энергия. 2010. №3 (106). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskoe-obosnovanie-konstruktsii-universalnogo-mochnogo-ustroystva-abrazivno-kavitatsionnogo-deystviya> (дата обращения: 28.04.2024).

65. Повышение эффективности очистки и мойки сельскохозяйственных машин / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев, М.Б. Латышёнок, Г.К. Рембалович, И.А. Успенский, В.В. Терентьев, А.В. Шемякин // Министерство сельского хозяйства РФ ФГБОУ ВО РГАТУ - Рязань, 2016. - 102 с.

66. Экспериментальная установка для очистки сельскохозяйственной техники / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, К.В. Гайдуков, Е.Ю. Шемякина // Механизация и электрификация. - № 6. - М., 2008. - С. 29-30.

67. Келлер О.К., Кратыш Г.С, Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. Л.: Машиностроение (Ленинград. отд-ние), 1977. 184 с.

68. Экспериментальная установка для очистки двигателей перед ремонтом / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, А.М. Баусов, К.А. Жильцов, В.Н. Володин // Вестник АПК Верхневолжья. - № 1 (13). - 2011. - С. 82-83.

69. Шемякин, А.В. Теоретическое обоснование очистки

сельскохозяйственных машин с использованием энергии кавитации / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, Н.М. Морозова // Научный альманах.- № 10-3. - Тамбов, 2016.- С. 336-339.

70. Shemyakin, A.V. Experimental researches of agricultural machinery engines cleaning by icy and cavitation jet / A.V. Shemyakin, V.V. Terentyev, N.M. Morozova, A.V. Kirilin // Modern Science. -№ 10. - 2016. - С. 34-37.

71. Шемякин, А.В. Установка для очистки сельскохозяйственных машин перед ремонтом / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, Н.М. Морозова // Научный альманах. - № 10-3. - Тамбов, 2016.-С. 340-343.

72. Шемякин, А.В. Устройство для очистки сельскохозяйственных машин с использованием энергии вращающейся жидкостной струи / А.В. Шемякин, В.В. Терентьев, Н.М. Морозова, С.А. Кожин, А.В. Кирилин // Вестник РГАТУ. - № 3. - Рязань, 2016.- С. 77-80.

73. Котухов А. В., Красовский А. В., Шаплыко В. В., Дежкунов Н. В. Исследование зависимости активности акустической кавитации от температуры жидкости // Доклады БГУИР. 2015. №6 (92). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-zavisimosti-aktivnosti-akusticheskoy-kavitatsii-ot-temperatury-zhidkosti> (дата обращения: 09.07.2025).

74. Jtischke M., Koch C. // Model processes and cavitation indicators for a quantitative description of an ultrasonic cleaning vessel: Part I: Experimental results. Ultrasonics Sonochemistry. 2012. № 19. С. 787-795.

75. Приходько В.М., Симонов Д.С. Применение ультразвука для очистки от загрязнений ответственных деталей автотракторной техники // Транспортная техника. 2018. No 3(17). С. 61-66.

76. Шемякин А.В., Терентьев В.В., Кузин Е.Г. Очистка двигателей сельскохозяйственных машин перед ремонтом (экспериментальные исследования) // Вестник Ульяновской ГСХА. 2017. №1 (37). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ochistka-dvigatelay-selskohozyaystvennyh-mashin-pered-remontom-eksperimentalnye-issledovaniya> (дата обращения:

28.04.2024).

77. Север А.В., Ломовских А.Е. Безразборный способ очистки деталей двигателей внутреннего сгорания д-240 и д-243 от продуктов нагара и отложений // Символ науки. 2023. №12-1-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bezrazbornyyu-sposob-ochistki-detaley-dvigatelay-vnutrennego-sgoraniya-d-240-i-d-243-ot-produktov-nagara-i-otlozheniy> (дата обращения: 28.04.2024).

78. Борис Л.И., Булат Г.З., Ильнур Х.Г., Рустем И.М. Обоснование параметров рабочего процесса машин для гидроструйной очистки поверхностей // Вестник Курганской ГСХА. 2023. №3 (47). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-parametrov-rabochego-protssesa-mashin-dlya-gidrostruynoy-ochistki-poverhnostey> (дата обращения: 28.04.2024).

79. Чуриков Д.О., Злобина И.В., Бекренев Н.В. Исследование влияния величины зазора, в котором возбуждаются ультразвуковые колебания, на степень очистки технологических жидкостей // Вестник СГТУ. 2023. №1 (96). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-velichiny-zazora-v-kotorom-vozbuzhdayutsya-ultrazvukovye-kolebaniya-na-stepen-ochistki-tehnologicheskikh> (дата обращения: 28.04.2024).

80. Калачев Ю.Н., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М. Применение ультра-звука в условиях эксплуатации автотракторных средств // Ультразвуковые технологические процессы-98: Тез. докл. науч.-техн. конф.М.: МАДИ (ТУ), 1998. С. 45-48.

81. Дорохов А.С., Корнеев В.М., Катаев Ю.В. Теоретическая оценка механизма микроударного воздействия воды на нагароотложения в двигателях // Технический сервис машин. 2019. N2 (135). С. 67-74.

82. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства // Вестник евразийской науки. 2013. №3 (16). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-ultrazvukovoy-ochistki-detaley-v-usloviyah-osnovnogo-i-remontnogo->

proizvodstva (дата обращения: 28.04.2024).

83. Синицын Александр Константинович, Ордоньес Виласис Алехандро Ультразвуковая гальванотехнология восстановления прецизионных деталей дизелей // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2013. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ultrazvukovaya-galvanotehnologiya-vosstanovleniya-pretsizionnyh-detaley-dizeley> (дата обращения: 28.04.2024).

84. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974.– С. 380–421.

85. Shimada M., Kobayashi T., Matsumoto Y. Dynamics of Cloud Cavitation and Cavitation Erosion – 1999.

86. Mettin R., Luther S., Ohl C.-D., Lauterborn W. Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model // Ultrason. Sonochem. 1999. 6. P. 25–29.

87. Абрамов В.О., Приходько М.В. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. Москва: Русавиа; 2006.

88. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. Москва: Химия; 1983.

89. Дудзинский Ю. М. Кавитационная эрозия в условиях гидростатического давления / // Акустический вестник. 2006. Т. 9, N 2. С. 56-62.

90. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Роцин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. - Л.: Колос, 1980. - 168 с.

91. Минчук В. С., Перхунова А. Ю., Котухов А. В., Дежкунов Н. В. Исследование связи эрозионной активности кавитации и интенсивности кавитационного шума // Доклады БГУИР. 2020. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svyazi-erozionnoy-aktivnosti-kavitatsii-i-intensivnosti-kavitatsionnogo-shuma> (дата обращения: 09.07.2025).

92. Pramod Kumar and Satendra Singh Experimental Study for Cleanliness

Evaluation of Tractor Engine Components To cite this article: 2022 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1224 012013

93. Kobayashi, Y., Ayame, T., Shibuya, k., Nakagawa, T., Kubota, Y., Gonda, K. and Ohuchi, N. (2016) "Stabilization of silica-coated silver iodide nanoparticles by ethanol-washing", *Pigment & Resin Technology*, Vol. 45 Issue: 2, pp.99-105.

94. Goldman, I.B., Aitken, D.F. and Charest, D. (1991) "Eliminating Solvents in the Cleaning of Circuit Assemblies: A Case History", *Circuit World*, Vol. 17 Issue: 3, pp.48-52.

95. Card, A., Moore, MA and Ankeny, M. (2006) "Garment washed jeans: impact of launderings on physical properties", *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 18 Issue: 1, pp.43-52.

96. Komal, (2017) "Fuzzy reliability analysis of the washing system in a paper plant using the TBFLT technique", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34 Issue: 8.

97. Brian N. Ellis, C.v Eng., M.I.E.R.E., F. Inst.C.T., (1980) "Water Soluble Fluxes for PCB Soldering and Contamination Control", *Circuit World*, Vol. 6 Issue: 3, pp.6-10.

98. P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, A. Struckas, Ultrasonic system for solar panel cleaning, *Sens. Actuators A* 200 (2013) 74–78.

99. J. Li, R.D. Sanderson, E.P. Jacobs, Ultrasonic cleaning of nylon microfiltration membranes fouled by Kraft paper mill effluent, *J. Membr. Sci.* 205 (2002) 247– 257.

100. C. Loderer, D. Pawelka, W. Vazier, P. Hasal, W. Fuchs, Dynamic filtration – ultrasonic cleaning in a continuous operated filtration process under submerged conditions, *Sep. Purif. Technol.* 119 (2013) 72–81.

101. G. Mazue, R. Viennet, J.Y. Hihn, L. Carpentier, P. Devidal, I. Albaïna, Large-scale ultrasonic cleaning system: Design of a multi-transducer device for boat cleaning (20 kHz), *Ultrason. Sonochem.* 18 (2011) 895–900.

102. J.S. Bartos, R.J.S. Onge, Cleaning and preservation unit for turbine

engine, in: Google Patents, 1977.

103. N. Eliaz, G. Shemesh, R. Latanision, Hot corrosion in gas turbine components, *Eng. Fail. Anal.* 9 (2002) 31–43.

104. D. Baumann, N. Prinz, Filter for cleaning lubricating oil, in: Google Patents, 1990.

105. W. Siegert, Microbial contamination in diesel fuel—are new problems arising from biodiesel blends, in: *Proceedings of the 11th International Conference on the Stability and Handling of Liquid Fuels*, 2009, pp. 18–22.

106. T.J. Mason, Ultrasonic cleaning: an historical perspective, *Ultrason. Sonochem.* 29 (2015) 519–523.

107. D. Feng, J.S.J. van Deventer, C. Aldrich, Ultrasonic defouling of reverse osmosis membranes used to treat wastewater effluents, *Sep. Purif. Technol.* 50 (2006) 318–323.

108. K.S. Suslick, *Ultrasound: Its Chemical, Physical, and Biological Effects*, VCH Publishers, 1988.

109. M.O. Lamminen, H.W. Walker, L.K. Weavers, Cleaning of particle-fouled membranes during cross-flow filtration using an embedded ultrasonic transducer system, *J. Membr. Sci.* 283 (2006) 225–232.

110. T.J. Mason, J.P. Lorimer, *Applied sonochemistry, Uses Power Ultrasound Chem. Process.* (2002) 1–48.

111. N.S.M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, M. Ashokkumar, Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications, *Ultrason. Sonochem.* 29 (2015) 568–576.

112. T. Leighton, *The Acoustic Bubble*, Academic press, 2012.

113. M.O. Lamminen, H.W. Walker, L.K. Weavers, Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes, *J. Membr. Sci.* 237 (2004) 213–223.

114. F. Wang, Y. Wang, M. Ji, Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration, *J. Hazard. Mater.* 123 (2005) 145–

150.

115. S. Manickam, V.N.D. Arigela, P.R. Gogate, Intensification of synthesis of biodiesel from palm oil using multiple frequency ultrasonic flow cell, *Fuel Process. Technol.* 128 (2014) 388–393.

116. J. David, N. Cheeke, *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*, Physics Department Concordia University Montreal, Quebec, Canada, 2002.

117. M. Sivakumar, S.Y. Tang, K.W. Tan, Cavitation technology – a greener processing technique for the generation of pharmaceutical nanoemulsions, *Ultrason. Sonochem.* 21 (2014) 2069–2083.

118. Поверхностно-активные вещества и моющие средства: справочник / А.А. Абрамзон. М.: Гиперокс, 1993. 270 с.

119. Иванова, Т.Н. Из опыта разработки технологии и оборудования для ультразвуковой высокоамплитудной очистки / Т.Н. Иванова, В.М. Приходько, А.П. Панов // Оптимизация и интенсификация технологических процессов в приборостроении: тез. докл. науч.-техн. конф. – М.: МИНХ, 1978. – С. 18.

120. Савченко В.И. Очистка и мойка машин. М.: Россельхозиздат, 1974. 124 с.

121. Бондаренко А. П., Пашкова О. О. Применение гидродинамической кавитации для очистки трубопроводов // Научный лидер. 2022. №47 (92).

122. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве; Учебное пособие/ В.И.Черноиванов [и др.]: подбщ. ред. В.И. Черноиванова. - Москва-Челябинск; ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. - 992 с

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1 – Акт об использовании в учебном процессе результатов научно-исследовательской работы

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева
доктор биологических наук, профессор
Селионова Марина Ивановна



«19» июня 2025 г.

Акт

об использовании в учебном процессе результатов научно-исследовательской работы Петрика Д.Ю. на тему «Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах»

Теоретические и практические разработки, представленные в научно-исследовательской работе Петрика Д.Ю., используются в учебном процессе, а именно:

1. Основные положения работы Петрика Д.Ю. используются при проведении практических занятий по дисциплине «Техническая эксплуатация» со студентами, обучающимся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

И.о. директора института механики
и энергетики имени В.П. Горячкина



А.Г. Арженовский

Приложение 2 – Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель

Научно-исследовательского центра
по испытаниям и доводке
автомототехники

ФГУП «НАМИ»

Д. А. Загарин
«06» июня 2025 г.



Акт

внедрения результатов научно-исследовательской работы
«Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных
машинах» в операционную деятельность предприятия.

Технологические решения и методики очистки деталей топливной аппаратуры, включающие оптимизированные параметры процесса очистки и применение эффективных моющих растворов, являющиеся результатом законченной научно-исследовательской работы Петрика Дмитрия Юрьевича на тему «Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах», проходили экспериментальное внедрение в 2025 году.

Предложенные решения направлены на модернизацию технологических процессов при техническом обслуживании и ремонте подвижного состава, а методики очистки деталей позволяют существенно повысить качество обработки ответственных узлов, в частности распылителей топливной аппаратуры, за счет применения научно обоснованных параметров процесса и современных технологических режимов.

Применение разработанных решений в автомобильной, железнодорожной промышленности, а также агропромышленном комплексе, позволит обеспечить предприятиям технического сервиса возможность более эффективно организовывать процессы восстановления работоспособности эксплуатируемой техники. Внедрение позволяет сократить время простоя машин в ремонте и повысить общее качество выполняемых работ при сохранении высокого уровня очистки деталей.

Заместитель руководителя по научной работе -
Начальник научно – исследовательского комплекса, к.т.н.

А.Б. Лагузин

Приложение 3 – Свидетельство о регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2023621772

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
**ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ, ОХРАНЯЕМОЙ
АВТОРСКИМИ ПРАВАМИ**

Номер регистрации (свидетельства):
2023621772

Дата регистрации: 01.06.2023

Номер и дата поступления заявки:
2023621451 19.05.2023

Дата публикации и номер бюллетеня:
01.06.2023 Бюл. № 6

Контактные реквизиты:
Snezkina@rgau-msha.ru

Автор(ы):

Петрик Дмитрий Юрьевич (RU)

Правообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный
аграрный университет - МСХА имени К.А.
Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА
имени К.А. Тимирязева) (RU)**

Название базы данных:

«Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах»

Реферат:

База данных предназначена для хранения информации об очистке загрязненных поверхностей деталей машин сельскохозяйственного назначения с целью их поддержания в работоспособном состоянии. Может быть использована в образовательном процессе как лекционный материал или дополнение к проведению практических занятий, для дидактического обеспечения курсов повышения квалификации специалистов в сфере технического обслуживания машин. Пользователями базы данных могут быть студенты, обучающиеся по специальности «Агроинженерия» магистранты, аспиранты, обучающиеся по направлению подготовки «Сервис транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования», преподаватели ВУЗов, а также специалисты и руководители предприятий АПК.

**Вид и версия системы управления базой
данных:**

Office PowerPoint 2007 и выше

Объем базы данных:

1,76 МБ