

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025 год

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель: **Дидманидзе Отари Назирович**,
доктор технических наук, профессор, академик РАН,
заведующий кафедрой тракторов и автомобилей
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Официальные
оппоненты** **Варнаков Дмитрий Валерьевич**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры техносферной безопасности ФГБОУ
ВО «Ульяновский государственный университет»

Фадеева Екатерина Ивановна,
кандидат технических наук, главный специалист
обособленного подразделения в г. Тула ООО «РЕСО-
Лизинг»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Защита состоится 30 октября 2025 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03

Н. Н. Пуляев

Актуальность темы исследования. В современных условиях развития агропромышленного комплекса поддержание работоспособности сельскохозяйственной техники приобретает первостепенное значение. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность эксплуатации машин, является качество их технического обслуживания, в частности, очистка загрязненных поверхностей деталей.

Проблема очистки деталей сельскохозяйственной техники обусловлена тем, что неполное удаление загрязнений снижает ресурс оборудования на 20...30 %. При этом существующие технологии очистки не всегда обеспечивают требуемое качество обработки, особенно в случае прочно связанных загрязнений (продукты коррозии, старое лакокрасочное покрытие), которые занимают около 10% общей площади поверхности деталей.

Традиционные методы очистки, основанные на применении струй высокого давления и погружных моечных машин, имеют ряд существенных ограничений. Они требуют значительных материальных затрат на приобретение и нагрев моющих растворов, оказывают негативное влияние на окружающую среду и не всегда обеспечивают необходимую эффективность очистки деталей сложной конфигурации.

Особую актуальность приобретает разработка и внедрение инновационных технологий очистки, позволяющих интенсифицировать процесс удаления загрязнений при одновременном снижении ресурсоемкости. Перспективным направлением является применение ультразвуковых технологий, обеспечивающих комплексное физико-химическое и механическое воздействие на загрязнения.

Степень разработанности темы исследования. 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 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 работы: обосновать технологический процесс очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники в погружных моечных машинах методом ультразвуковой очистки, повышающего качество очистки деталей.

Задачи исследования:

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.

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.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии научных представлений о процессах ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники путем установления оптимальных параметров технологического процесса и создания математических моделей, описывающих эффективность кавитационного воздействия при различных режимах очистки, что позволяет расширить методологическую базу технического сервиса в агропромышленном комплексе.

Практическая ценность результатов 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.

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

Предмет исследования заключается в факторах, определяющих 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.

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.

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.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических 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, посвященная 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 БД.

Структура и объем 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится общая характеристика работы, представлена актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи научного исследования, отражена научная новизна работы, а также достоверность результатов и их практическая значимость.

В первой главе «Состояние проблемы и задачи исследования» рассмотрено состояние проблемы очистки деталей сельскохозяйственной техники, проведён обзор существующих видов загрязнений и природы их возникновения, проведен анализ технологий очистки и погружных моечных машин.

В главе подробно рассмотрены основные виды загрязнений деталей сельскохозяйственной техники, включая неорганические отложения, органические загрязнения и химически связанные покрытия. Проанализированы особенности очистки различных типов загрязнений, в том числе масляно-грязевых отложений, продуктов коррозии, накипи и лакокрасочных покрытий.

Особое внимание уделено исследованию технологических аспектов процесса очистки, включая параметры процесса, характеристики моющих средств и конструктивные особенности оборудования. Проведён анализ эффективности различных методов очистки применительно к деталям сложной конфигурации.

В рамках исследования осуществлён комплексный анализ применяемых технологий очистки, включая струйные методы, погружные моечные установки, ультразвуковую обработку, электрогидравлический и виброобразивный способы. Особое внимание уделено технологическим параметрам процессов, характеристикам используемого оборудования и экологическим аспектам применения различных методов.

В ходе анализа выявлены существенные недостатки традиционных методов очистки, выражающиеся в недостаточной эффективности удаления загрязнений, высоких материальных затратах на реализацию процессов, неблагоприятном воздействии на окружающую среду и сложностях при обработке деталей сложной конфигурации.

На основе проведённого исследования определены перспективные направления развития технологий очистки, включающие интенсификацию ультразвукового воздействия, оптимизацию технологических параметров процессов, разработку новых моющих композиций и совершенствование конструкции очистного оборудования.

Во второй главе «Теоретические предпосылки интенсификации погружной очистки деталей двигателей сельскохозяйственной техники ультразвуковыми колебаниями» представлены математические модели технологического процесса ультразвуковой очистки деталей, выявлены основные факторы, влияющие на механизм кавитационной очистки и пределы их изменения.

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:

$$W_a = \frac{N_{\text{э}}}{s} \eta_a ; \quad (1)$$

где $N_{\text{э}}$ – 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.

Скорость колебания материальной точки можно определить из выражения:

$$U = \frac{da}{dt} = A\omega \cos\omega\left(t - \frac{x}{c}\right); \quad (2)$$

где A – амплитуда колебаний, м; ω – циклическая частота, рад/с; t – время, с; x – координата точки, м; c – удельное сопротивление среды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{сек}}$.

Ускорение точки определяется по формуле:

$$b = \frac{d}{dt} = \frac{d^2 a}{dt^2} = A\omega^2 \sin\omega\left(t - \frac{x}{c}\right); \quad (3)$$

Переменное давление, вызываемое волной, характеризуется уравнением:

$$p = \omega A c \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right); \quad (4)$$

Амплитуда звукового давления:

$$P = \omega c A. \quad (5)$$

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

Энергия в единице объема среды, в которой распространяется волна, складывается из кинетической энергии и потенциальной волной энергии:

$$E = E_K + E_p; \quad (6)$$

где E – полная энергия в единице объёма, Дж/м³; E_K – кинетическая энергия, Дж/м³; E_p – потенциальная энергия, Дж/м³.

Кинетическая энергия характеризуется уравнением:

$$E_K = \frac{1}{4} A^2 \omega^2; \quad (7)$$

Полная энергия при равенстве кинетической и потенциальной энергий определяется по формуле:

$$E = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} V^2; \quad (8)$$

где V – амплитуда колебательной скорости, м/с.

Формула 9 связывает амплитуду колебательной скорости с параметрами волны:

$$V = A \omega; \quad (9)$$

Эту величину называют плотностью звуковой энергии.

Интенсивность, или сила звука, определяется выражением:

$$I = E_c = \frac{1}{2} c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} c V^2 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right) \quad (10)$$

где I – интенсивность звука (сила звука), Вт/м²; E_c – плотность звуковой энергии, Дж/м³; c – удельное сопротивление среды, кг/(м²·с).

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

$$A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2I}{c}}; \quad (11)$$

где A – максимальное смещение частиц среды, м; f – частота колебаний, Гц.

$$V = \sqrt{\frac{2I}{c}}; \quad (12)$$

$$B = 2\pi f \sqrt{\frac{2I}{c}}; \quad (13)$$

где B – максимальное ускорение частиц, м/с².

Мощность (N) источника колебаний:

$$N = IdF; \quad (14)$$

где N — мощность источника колебаний, Вт; dF — элемент площади замкнутой поверхности, m^2 ; F — замкнутая поверхность, содержащая источник колебаний, m^2 .

Для плоского ультразвукового пучка с поперечным сечением F :

$$N=IF \quad (15)$$

откуда:

$$I = \frac{P_c C}{a}; \quad (16)$$

где P — амплитуда переменного звукового давления, n/m^2 ; P_c — давление излучения, n/m^2 ; a — константа, близкая к единице.

Разнообразие задач и объектов очистки обуславливает необходимость учитывать множество специфических факторов при реализации процессов и решении проблем автоматизации ультразвукового воздействия в оптимальном режиме.

Экспериментальные исследования, проведенные ранее, 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:

$$\Delta K = f(W, t, C), [\%], \quad (17)$$

где W — мощность кавитационного устройства, Вт; t — длительность кавитации, мин; C — концентрация средства для очистки, %; ΔK — качество очистки, %.

Пределы изменения этих факторов обуславливаются пределами изменения W , t и C , при которых получена функция (17). Регрессионная модель построена в пределах изменения: W , мощность ультразвукового кавитационного устройства — 160...400 Вт; t , время обработки в кавитационной среде — 0...40 мин; C , концентрация средства для очистки — 10...50 %.

Указанные 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.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена методология проведения экспериментальных работ, включающая разработку программы исследований, выбор параметров процессов и методов оценки эффективности очистки.

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 1). Данная установка предназначена для эффективного удаления различных типов загрязнений с поверхностей обрабатываемых деталей, включая масляно-грязевые отложения, коррозионные образования и устаревшие лакокрасочные покрытия.

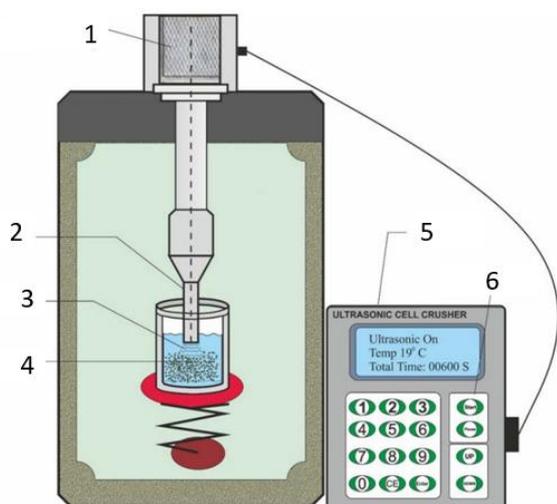


Рисунок 1 – Функциональная схема ультразвуковой установки «УЗДН-А»:
1 – преобразователь, 2 – ультразвуковой зонд, 3 – ультразвуковая кавитация, 4 – испытуемый образец, 5 – генератор, 6 – блок управления.

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 проводили 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:

$$\frac{\Delta m}{m} = 1 - e^{(-\alpha \cdot K^{0,5})}; \quad (18)$$

где Δm и m – удалённая и исходная масса материала; α – коэффициент интенсивности кавитационного воздействия (безразмерная величина); K – показатель активности кавитационного процесса (безразмерная величина).

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

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}x_{ju} = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{1, k}, \quad (19)$$

где \sum – знак суммирования; N – количество точек плана эксперимента (общее число опытов); k – количество независимых факторов (переменных) в эксперименте; x_{iu} – значение i -го фактора в u -том опыте; i и j – индексы, пробегающие значения от 1 до k ; условие $i \neq j$ означает, что суммирование производится для разных 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.

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.

В четвертой главе «Результаты исследования и их анализ» представлены результаты комплексных экспериментальных и практических исследований по ультразвуковой очистке деталей сельскохозяйственной техники, в частности распылителей топливных форсунок двигателя МТЗ-82.

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 1.

Таблица 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	Адгезия, МПа	Условный коэффициент прочности, К
Продукты топливных отложений	Воск, гудроны и олефины	40	40	0,5	4,0
Асфальтосмолистые 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

Было исследовано влияние содержания различных органических растворителей на эффективность очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82. Были исследованы трихлорэтилен, ацетон, дихлорэтан и

изопропиловый спирт при различных температурных режимах очистки – 30, 50 и 80 °С.

На рисунках 3-5 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.

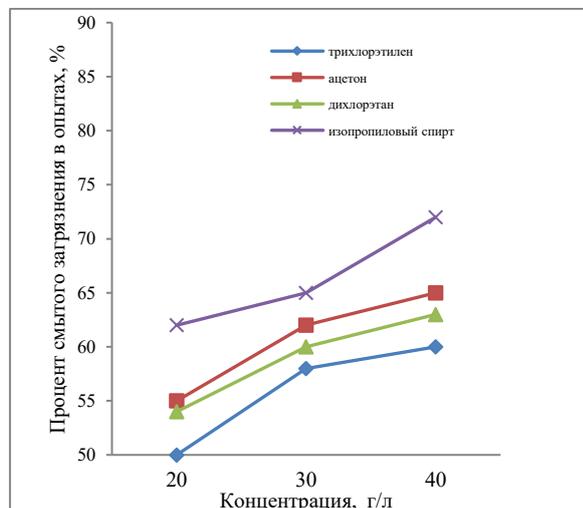


Рисунок 3 – Результаты влияния вида и содержания органических растворителей на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30 °С

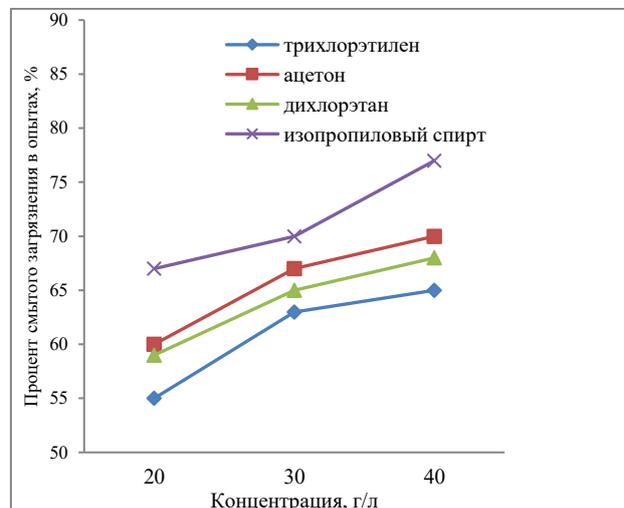


Рисунок 4 – Результаты влияния вида и содержания органических растворителей на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 50 °С

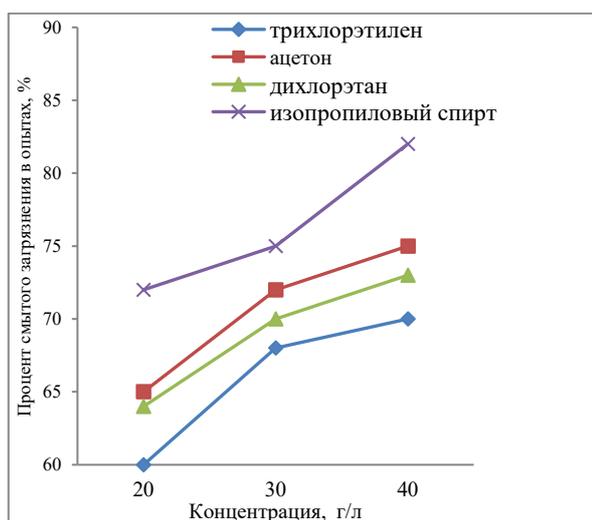


Рисунок 5 – Результаты влияния вида и содержания органических растворителей на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 80 °С

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.

На рисунках 6-8 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.

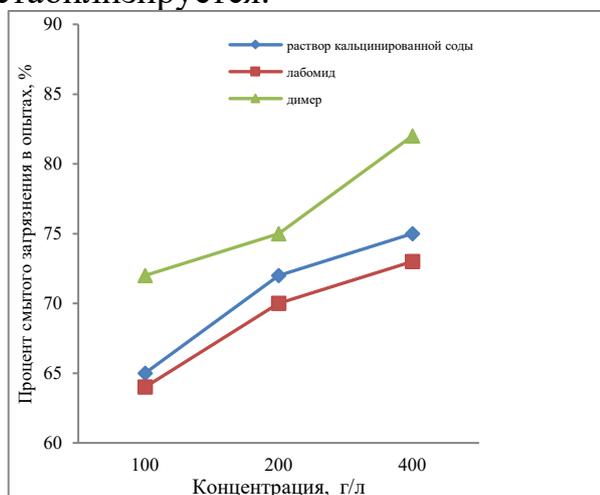


Рисунок 6 – Результаты влияния вида и содержания компонента раствора для чистки на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 30 °С

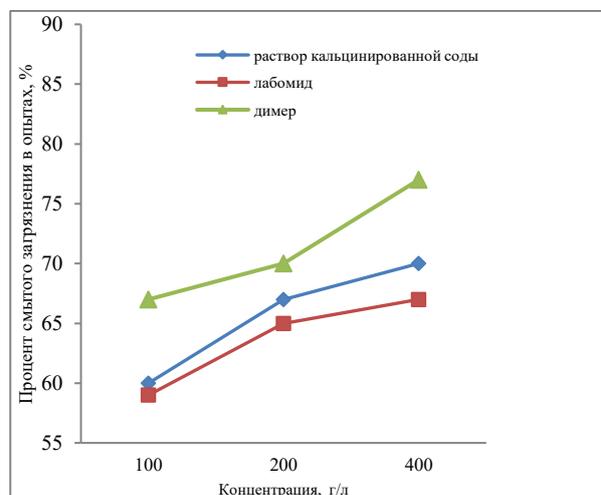


Рисунок 7 – Результаты влияния вида и содержания очищающих компонента раствора на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 50 °С

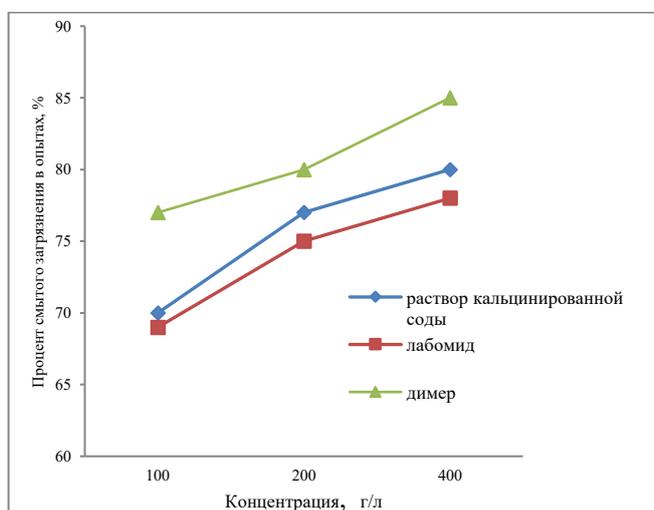


Рисунок 8 – Результаты влияния вида и содержания очищающих компонента раствора на уровень очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при температуре очистки 80 °С

Из результатов (рисунки 6-8) видно, что все компоненты растворов очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 положительно влияют на эффективность очистки, при этом наиболее эффективным является димер. Их эффективность очистки повышается с увеличением температуры.

На рисунках 9-10 была получена зависимость интенсивности процесса ультразвуковой очистки от расстояния очищаемой поверхности распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 от излучателя.

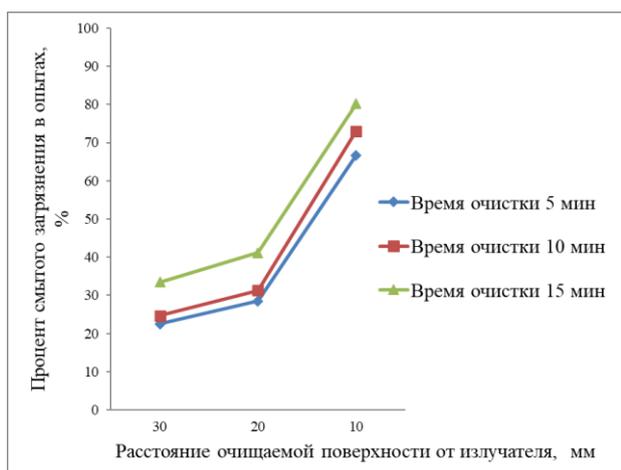


Рисунок 9 – Исследование влияния расстояния очищаемой поверхности от излучателя на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при различном времени процесса

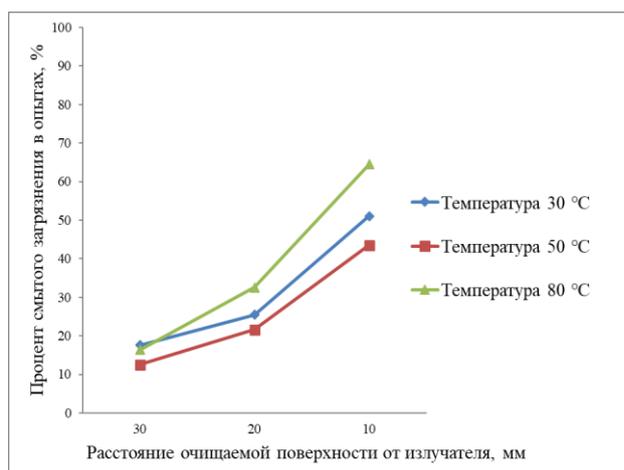


Рисунок 10 – Исследование влияния расстояния очищаемой поверхности от излучателя на уровень очистки от загрязнений распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 при различных температурных режимах, °C

В рамках 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 °C и минимальном расстоянии в 10 мм.

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

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (20)$$

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 :

$$Y_1 = 68,0027 + 3,734X_1 - 0,4333X_2 - 0,0748X_1^2 + 0,0015X_1X_2 + 0,046X_2^2; \quad (21)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и концентрации раствора X_1 :

$$Y_2 = 105,8459 + 4,3553X_1 - 17,9067X_3 - 0,0793X_1^2 - 0,0754X_1X_3 + 1,4884X_3^2; \quad (22)$$

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

$$Y_3 = 184,7866 - 0,3901X_2 - 25,0267X_3 + 0,0056X_2^2 - 0,0305X_2X_3 + 1,8718X_3^2. \quad (23)$$

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:

$$Y_4 = 90,1073 - 1,101X_1 + 0,5983X_2 + 0,0074X_1^2 + 0,0114X_1X_2 - 0,006X_2^2; \quad (24)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и концентрации раствора X_1 :

$$Y_5 = 280,4974 + 1,1099X_1 - 57,8101X_3 + 0,0176X_1^2 - 0,3034X_1X_3 + 4,7153X_3^2; \quad (25)$$

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

$$Y_6 = 222,8166 - 0,0356X_2 - 36,2227X_3 - 0,0058X_2^2 + 0,1269X_2X_3 + 1,9937X_3^2; \quad (26)$$

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:

$$Y_7 = 120,535 - 1,0527X_1 - 1,2993X_2 + 0,023X_1^2 + 0,0018X_1X_2 + 0,0113X_2^2; \quad (27)$$

– от содержания загрязнений на распылителе топливной форсунки двигателя МТЗ-82 X_3 и концентрации раствора X_1 :

$$Y_8 = 52,1695 - 0,796X_2 + 14,3766X_3 - 0,0331X_2^2 + 0,3428X_2X_3 - 1,7508X_3^2; \quad (28)$$

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

$$Y_9 = 163,5227 - 2,0081X_2 - 11,1875X_3 + 0,0066X_2^2 + 0,2485X_2X_3 - 0,2724X_3^2. \quad (29)$$

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.

Параметр X_4 (время очистки) в силу своей незначительности в формулах отсутствует.

В рамках выполнения лабораторных работ была разработана комплексная технология ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники, сопровождаемая созданием специализированного технологического оборудования:

- резервуар для жидкого раствора объёмом 5 литров (рисунок 11). Резервуар разработан под конкретный тип деталей – распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82;



Рисунок 11 – 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. 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 – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

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 $30...40 \text{ }^\circ\text{C}$, для лабомида $60...70 \text{ }^\circ\text{C}$,

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.

На основании полученных результатов лабораторных исследований разрабатывался процесс очистки распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82 в рамках натуральных исследований в деятельности ФГУП «НАМИ». На рисунке 12 представлены детали сельскохозяйственной техники трактора МТЗ в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82, которые поддавались процессу очистки.



Рисунок 12 – Детали сельскохозяйственной техники трактора МТЗ в виде распылителя топливной форсунки двигателя МТЗ-82

В таблице 2 показаны различные параметры процесса очистки на ультразвуковой установке УЗДН-А с постоянной частотой колебаний, такие как температура, загрязнение и время очистки компонентов.

Таблица 2 – 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

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.

Анализ результатов проведения натурных испытаний по очистке распылителя топливной форсунки двигателя модели МТЗ-82 (согласно данным таблицы 2) демонстрирует, что для всех исследуемых компонентов зафиксирован показатель степени очистки, превышающий 86% (рисунок 13).



Рисунок 13 – 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.

В пятой главе «Оценка технико-экономической эффективности результатов исследования» представлены результаты комплексной оценки технико-экономической эффективности разработанной технологии ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники.

Исследование базируется на сравнительном анализе двух технологических подходов к очистке деталей тракторов МТЗ-82: традиционного метода с использованием моечной установки АМ1400 АК и разработанного процесса ультразвуковой очистки.

Исходными данными для расчета послужили результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований: при использовании новой технологии средний межремонтный ресурс двигателей составил 4932,2 мото-часа при коэффициенте вариации 5,6%, тогда как при традиционной очистке этот показатель равен 4043 мото-часа с коэффициентом вариации 11%.

Экономическая эффективность внедрения новой технологии подтверждается следующими показателями:

- базовая стоимость комплекта оборудования составляет 205 000 рублей;
- годовая экономия при использовании ультразвуковой очистки достигает 500 000 рублей;
- расчетная годовая эффективность составляет 16 650 000 рублей.

При этом несмотря на то, что стоимость нового оборудования на 115 % превышает стоимость базового, его внедрение обеспечивает существенное увеличение производительности (на 250 %) при сохранении сроков службы.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой практической значимости разработанной технологии и целесообразности её применения в промышленных масштабах, что подтверждается значительным увеличением межремонтного ресурса двигателей и существенной экономической эффективностью.

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 натуральных 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 семидневыми 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.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Петрик, Д. Ю. Интенсификация процесса очистки в погружных моечных машинах / Д. Ю. Петрик, В. М. Корнеев // *Агроинженерия*. – 2022. – №5. – С. 73-77.

2. Петрик, Д. Ю. Определение оптимальных технологических параметров процесса очистки деталей в погружных моечных машинах / Д. Ю. Петрик, В. М. Корнеев // *Агроинженерия*. – 2023. – № 4. – С. 81-84.

3. Петрик, Д. Ю. Анализ эффективности внедрения технологии ультразвуковой очистки деталей сельскохозяйственной техники / О. Н. Дидманидзе, Д. Ю. Петрик // *Техника и оборудования для села*. – 2025. – № 7. – С. 37-38.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях:

4. Петрик, Д. Ю. Факторы интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах (на примере ультразвукового метода очистки) / Д. Ю. Петрик, В. М. Корнеев // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2023. – № 1 (86). – С. 127.

5. Петрик, Д. Ю. Теоретические предпосылки интенсификации погружной очистки ультразвуковыми колебаниями / Д. Ю. Петрик // В сб.: *Доклады ТСХА*. – 2022. – Том 2.

6. Петрик, Д. Ю. Исследования факторов интенсификации и процессов очистки деталей в погружных моечных машинах / Д. Ю. Петрик // – *Конференция: Аграрная наука*. – 2022.

7. Петрик, Д. Ю. Contexte théorique de l'intensification du nettoyage submersible par vibrations ultrasoniques / Д. Ю. Петрик // В сб.: материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А. Н. Костякова – 2022. – Том 2.

8. Петрик, Д. Ю. Méthodes pour augmenter l'efficacité du nettoyage des pièces dans les laveuses submersibles / Д. Ю. Петрик // В сб.: материалы всероссийской с международным участием научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 155-летию со дня рождения Н. Н. Худякова. – 2021. – С. 271-275.

9. Петрик, Д. Ю. Исследование факторов интенсификации процессов очистки деталей в погружных моечных машинах / В. М. Корнеев, Д. Ю. Петрик // *Материалы XII Международной научно-практической конференции*. Владикавказ, 2022. – С. 24-28.

Программы для ЭВМ, базы данных, патенты

10. Свидетельство о государственные программы базы данных № 2023621772 Российская Федерация. «Интенсификация процесса очистки деталей в погружных моечных машинах» № 2023621451., дата регистрации: 19.05.2023; дата публ. 01.06.2023 / Д.Ю. Петрик; Правообладатели Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева».

Монографии

11. Петрик, Д. Ю. Современная агроинженерия / В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, М. Н. Ерохин [и др.]. – М. : ООО «Мегаполис», 2022. – 413 с. – ISBN 978-5-6049928-2-1.