На правах рукописи

Даманский Роман Викторович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПАР РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИСАДКИ К ДИЗЕЛЬНОМУ ТОПЛИВУ

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Омск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина» (ФГБОУ ВО «Омский ГАУ»).

Научный руководитель: **Керученко Леонид Степанович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Озорнин Сергей Петрович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», профессор кафедры «Транспортные и технологические системы»

Кочергин Виктор Иванович
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского», (ФГБОУ ВО «Иркутский ГАУ»)

Защита состоится «09» сентября 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.278.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук (СФНЦА РАН) по адресу: 630501, а/я 463, Новосибирская обл., Новосибирский р-н, р.п. Краснообск-1, СФНЦА РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью вашего учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 630501, а/я 463, Новосибирская обл., Новосибирский р-н, р.п. Краснообск – 1, СФНЦА РАН. Телефон (факс): 8(383)348-12-09; e-mail: aspsibime@ngs.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в Сибирской научной сельскохозяйственной библиотеке. Автореферат и диссертация размещены на сайтах: https://sfsca.ru и https://vak.minobrnauki.gov.ru.

Автореферат разослан «____» _____2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Назаров Николай Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Качественное и своевременное выполнение сельскохозяйственных операций в большей мере зависит от работоспособного состояния мобильных энергетических средств (МЭС). Одной из технически сложных и малоресурсных систем дизельных двигателей МЭС является топливная система. Затраты на техническое обслуживание и ремонт топливной аппаратуры составляют до 30% общих затрат на МЭС. Топливная аппаратура определяет мощностные и экономические показатели двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Наличие в топливной системе прецизионных сопряжений определяет ресурс топливной аппаратуры дизельных двигателей.

Ресурс прецизионных пар топливной аппаратуры определяется смазывающей способностью, что является следствием несовершенства существующих требований, предъявляемых к топливам. Для улучшения смазочных свойств топлив, в них содержатся присадки. В настоящее время в основном используются противоизносные присадки импортного происхождения, состав которых не известен и не сертифицирован.

В условиях рядовой эксплуатации необходимо обеспечить установленный заводом-изготовителем ресурс прецизионных пар распылителей форсунок путём улучшения эксплуатационных свойств топлив подбором компонентного состава и концентрации присадок в дизельное топливо. Использование противоизносных присадок в дизельном топливе позволит существенно увеличить ресурс деталей топливной аппаратуры ДВС.

Практика применения присадок в дизельном топливе показала, что нужен дифференцированный подход применения присадок, исходя из следующих требований: увеличение ресурса деталей распылителей, экономических возможностей применения и сравнение полученного эффекта с дополнительными затратами, а следовательно поиск и обоснование применения присадок. В связи с этим, исследование, направленное на обеспечение работоспособного состояния распылителей форсунок тракторных дизельных двигателей применением присадки к дизельному топливу, имеет научно-практическое значение.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросы, связанные с обеспечением работоспособного состояния деталей топливной системы ДВС рассмотрены в работах: Т.Е. Алушкина, М.К. Бураева, А.П. Быченина, В.А. Гавриловой, В.М. Горбова, Т.Ю. Гурина, С.Н. Девянина, Б.В. Дерягина, П.В. Дрюпина, В.А. Звонова, Л.С. Керученко, В.Г. Кислова, А.А. Кожевникова, В.М. Кондратьева, В.И. Кочергина, В.Е. Лазарева, А.П. Ликсутиной, Ю.П. Макушева, В.А. Маркова, Д.Д. Матиевского, С.А. Нагорнова, А.Е. Немцева, С.П. Озорнина, В.В. Острикова, Е.Г. Ротанова, А.П. Уханова, А.Л. Хохлова и др. Работы внесли значительный вклад в теоретические и практические исследования повышения долговечности топливной системы дизельных двигателей, в том числе с использованием растительных масел в дизельном топливе. Однако, в настоящее время требует рассмотрения вопрос о влиянии противоизносных присадок (на основе

растительных масел) в дизельном топливе на ресурс прецизионных пар распылителей форсунок.

Прецизионные пары распылителей форсунок при эксплуатации на дизельном топливе подвергаются изнашиванию вследствие значительных механических нагрузок. Дизельное топливо, с уже имеющимися в процессе изготовления в нём присадками, при транспортировке и хранении значительно теряет свои эксплуатационные свойства и становится малоэффективным при работе машинно-тракторного парка в условиях АПК. В результате ухудшения эксплуатационных свойств топлива повышается изнашивание деталей топливной аппаратуры, а именно прецизионных сопряжений распылителей форсунок.

Низкие эксплуатационные свойства дизельных топлив не обеспечивают долговечность прецизионных пар распылителей форсунок, что снижает эксплуатационные показатели дизельного двигателя. В связи с этим, дальнейшие теоретические и практические исследования, направленные на обеспечение работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадок на основе растительных масел, повышающих износостойкость топливной системы дизелей, становятся актуальной задачей.

Цель исследования – обеспечение работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадки к дизельному топливу, на основе таллового и льняного масел с добавлением полиалкилбензола (присадки ПТЛМ).

Задачи исследования:

1. Обосновать необходимость выбора компонентного состава и концентрации присадки к дизельному топливу для обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок.

2. Разработать функциональную модель для обоснования влияния дизельного топлива с присадкой ПТЛМ на показатели работоспособного состояния распылителей форсунок дизельных двигателей.

3. Разработать способ оценки износостойкости материала прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей по основному критерию - гидроплотности прецизионных пар, и провести оценку гидроплотности распылителей форсунок дизельных двигателей с использованием присадки ПТЛМ к дизельному топливу.

4. Провести эксплуатационную проверку и оценить экономическую эффективность применения присадки к дизельному топливу.

Объект исследования: процесс обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей внутреннего сгорания применением присадки ПТЛМ к дизельному топливу.

Предмет исследования: зависимости и закономерности процесса обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей от эксплуатационных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ.

Научная гипотеза: обеспечение работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей возможно за счет формирования граничного режима трения деталей прецизионных пар применением присадки на основе растительных масел с добавлением полиалкилбензола (присадки ПТЛМ).

Научная новизна:

- функциональная модель критерия обеспечения работоспособного состояния сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки с учётом эксплуатационных свойств присадки в дизельном топливе;
- закономерности изменения ресурса прецизионных пар распылителей форсунок в зависимости от компонентного состава и концентрации присадки ПТЛМ;
- результаты экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний прецизионных пар распылителей форсунок при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ.

Теоретическая значимость: результаты дополняют имеющие теоретические представления в части обеспечения критерия работоспособного состояния сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки при использовании присадки на основе минеральных масел (льняного и таллового).

Практическая значимость: разработана и предложена рецептура и компонентный состав с концентрацией присадки на основе минеральных масел, позволяющие обеспечить требующий межремонтный ресурс прецизионных пар распылителей форсунок дизельных ДВС. Значимость и актуальность диссертационной работы подтверждена актами внедрения на предприятиях АПК.

Методология и методы исследования. Общей методологической основой исследования являлся системный подход, обеспечивающий анализ процесса обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадки к дизельному топливу, с учётом эксплуатационных свойств топлива. В процессе исследования использовались положения теории: работоспособности, изнашивания, сопротивления материалов, методы численного и статистического моделирования состояния трибомеханической системы прецизионных пар распылителей форсунок в программных математических пакетах. Экспериментальные исследования базировались на методах лабораторных и эксплуатационных испытаниях прецизионных пар распылителей форсунок. Исследования выполнены с применением стандартных методик, специально разработанного и серийного оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

- функциональная модель критерия обеспечения работоспособного состояния сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки с учётом эксплуатационных свойств присадки в дизельном топливе;
- результаты экспериментальных исследований обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей с использованием дизельного топлива с присадкой ПТЛМ;
- результаты эксплуатационных испытаний прецизионных пар распылителей форсунок при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов исследований обеспечивалась методологией проведения эксперимента, устойчивой воспроизводимостью результатов, использованием поверенного метрологического оборудования, обоснованностью физических представлений, корректностью подготовки и проведения эксперимента, согласованностью с результатами других авторов.

Реализация результатов исследования.

Основные результаты исследований внедрены в предприятия АПК: ООО «ПОЛТАВА» Таврического района и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» Таврического района Омской области, а также включены в учебный процесс факультета технического сервиса в АПК ФГБОУ ВО «Омский ГАУ им. П.А.Столыпина».

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО «Омский ГАУ им. П.А. Столыпина» в рамках государственной темы № 0120.1 002691 «Исследование влияния альтернативных видов топлива на эксплуатационные параметры ДВС».

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты исследований докладывались на следующих конференциях:

- научно – практические конференции ФГБОУ ВО «Омский ГАУ им. П.А. Столыпина» (2016-2022 г.г.);
- X региональная научно–практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти доцента М.А. Анфиногенова «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования. Новосибирск - 2018 г.;
- всероссийский конкурс на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации по номинациям «Агроинженерия» и «Технические науки». Москва 29 мая 2018 года;
- международная научно – техническая конференция, посвященная 60-летию образования СибИМЭ СФНЦА РАН «Научно – техническое обеспечение АПК Сибири» / СибИМЭ, Новосибирск 2019 г.;
- кандидатский методический семинар в СФНЦА РАН 28 декабря 2020 г. Новосибирск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в рецензируемом зарубежном журнале, индексируемом в наукометрической базе SCOPUS, 8 статей в периодических сборниках, трудах и тезисах международных и всероссийских конференций, получено 2 патента на изобретение и полезную модель. Общий объём публикаций составил 4,5 печ. л., в том числе 3,04 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка, включающего 160 источников, в том числе 10 на иностранном языке. Диссертация включает 145 страниц машинописного текста, в котором 48 рисунков, 12 таблиц и 7 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель, объект и предмет диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» проведен обзор литературных источников, где рассмотрены проблемы, связанные с изнашиванием распылителей форсунок дизельных двигателей.

Проведен анализ изменения условий работы топливной аппаратуры ДВС с учётом технического состояния прецизионных пар распылителей форсунок закрытого типа с гидравлически управляемым запорным клапаном. Выполнена оценка ресурса материалов прецизионных пар распылителей в углеводородных жидкостях, в ходе которой установлено, что изнашивание деталей сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки характеризуется упругим и пластическим течением материала деталей и отделением его от контактирующей поверхности.

Рассмотрены требования к устройствам подачи топлива. Приведены критерии работоспособного состояния распылителей форсунок. Установлено, что основным критерием исправного состояния распылителей форсунок является гидроплотность прецизионных пар распылителя (в соответствии с ГОСТ 10579-2017). От гидроплотности сопряжения распылителя зависят технико-экономические показатели дизельного двигателя.

Проведен анализ способов обеспечения износостойкости прецизионных пар топливной аппаратуры. В работах А.Л. Болотокова, Т.Ю. Гурина установлено, что для повышения долговечности распылителей форсунок, в основном, используют технологические методы. Однако, они осуществимы только при проектировании и изготовлении деталей распылителя.

Помимо конструктивных особенностей и используемых материалов деталей распылителей, сравнительно наибольшая вероятность отказов распылителей форсунок связана с эксплуатационными свойствами дизельного топлива.

Стандарт на изготовление дизельного топлива Евро 5, Евро 6 существенно изменил требования по экологическому классу топлива. Уменьшение концентрации серы с 300 до 30 мг/л ужесточает процесс трения деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей.

В настоящее время снижение изнашивания деталей топливной аппаратуры проводится использованием растительных масел в дизельном топливе, содержащих поверхностно-активные вещества (ПАВ). Повышению долговечности топливной аппаратуры дизельных двигателей посвящены исследования: В.А. Гавриловой; В.М. Горбова; С.Н. Девянина; Б. В. Дерягина; В.А. Звонова; В.М. Кондратьева; В.А. Маркова; С.А. Нагорнова. Анализ работ показал, что для обеспечения работоспособности деталей топливной аппаратуры применением растительных масел, необходимо иметь на

предприятиях АПК установку для получения жирных кислот растительных масел, что усложняет процесс реализации.

Одним из направлений снижения изнашивания прецизионных сопряжений топливной аппаратуры и повышения их долговечности в условиях АПК, является использование дизельного топлива с присадкой. В настоящее время в России используются зарубежные присадки. Практика их применения показала, что присадки не удовлетворяют требованиям по противоизносным свойствам для использования в качестве смазки деталей распылителей форсунок.

В связи с этим, дальнейшие теоретические и практические исследования, направленные на обеспечение работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадок на основе растительных масел с добавлением полиалкилбензола, актуальны.

В настоящей работе исследовано использование дизельного топлива с присадкой на основе таллового и льняного масел с добавлением полиалкилбензола - присадка ПТЛМ, для обеспечения работоспособного состояния прецизионных сопряжений распылителя форсунки. На основе анализа исследований поставлены выше приведенные задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические предпосылки к обеспечению работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей» приведены: аналитическая и функциональная модели изнашивания прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей.

Помимо конструктивных особенностей, работоспособное состояние сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки зависит от смазочных свойств дизельного топлива. Основным критерием работоспособного состояния распылителя форсунки является гидроплотность прецизионных пар распылителя. Гидроплотность зависит от величины зазора сопряжения «игла-корпус распылителя».

Согласно нормативно-технической документации на форсунки закрытого типа с гидравлически управляемым клапаном, ресурс распылителей должен составлять не менее ½ ресурса форсунок.

Изнашивание запорного сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки происходит в результате пластической деформации микронеровностей поверхности деталей и усталостного разрушения поверхностного слоя, вызванного накоплением внутренней энергии.

Ввиду этого, функциональная зависимость для определения гидроплотности прецизионных пар распылителя с учетом эксплуатационных свойств топлива определяется из соотношения:

$$T_c = \frac{A \cdot \alpha}{h(t)^{5,78 h(t)^{0,0441}}}, \qquad (1)$$

где γ - удельный вес испытываемого топлива, Н/м^3;

α - коэффициент сжимаемости испытываемого топлива, м^2/Н;

$\nu_{ср}$ - среднее значение кинематической вязкости топлива для диапазона давлений P_1 и P_2, м^2/с;

L– длина уплотняющей части иглы, м;

$V_{экв}$ - объём вытекающего из прибора топлива, м^3;

D - номинальный диаметр иглы, м;

h – значение радиального зазора в уплотняющем сопряжении в момент времени t, м.

A - коэффициент, определяемый по формуле:

$$A = \frac{12 \cdot \gamma \cdot \nu_{ср} \cdot L \cdot V_{экв}}{\pi D g} \ln \frac{P_1}{P_2}, \qquad (2)$$

где γ - удельный вес испытываемого топлива, $\frac{H}{м^3}$;

$\nu_{ср} = \frac{\nu_{p_1} + \nu_{p_2}}{2}$ - среднее значение кинематической вязкости топлива для диапазона давлений p_1 и p_2, м^2/с ;

L - длина уплотняющей части иглы, м;

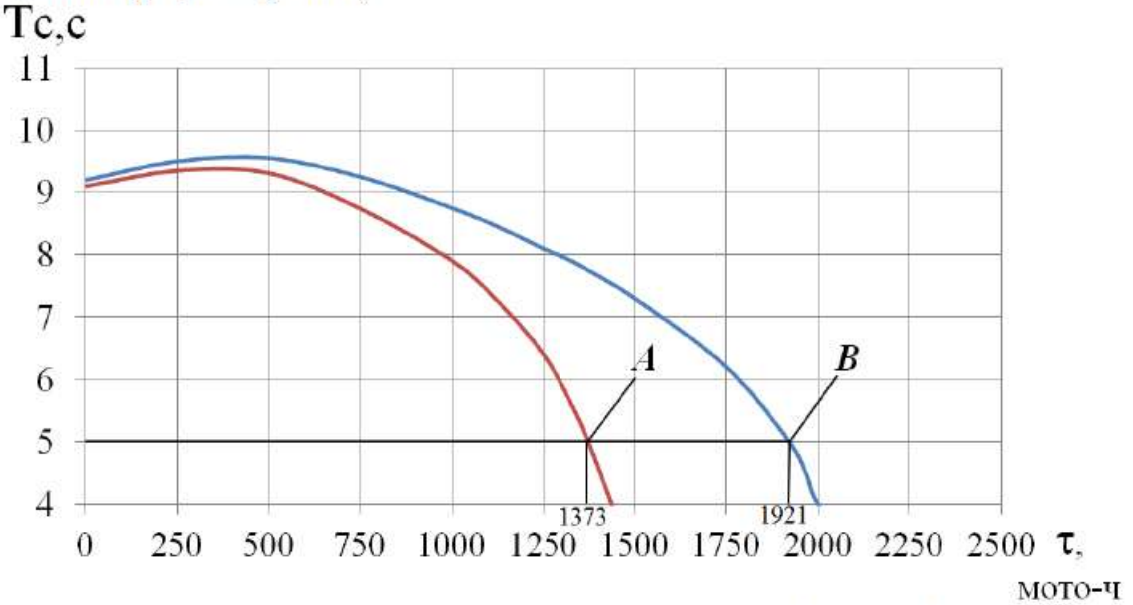
$V_{экв}$ - условный объём вытекающего из прибора топлива, м^3;

D - номинальный диаметр иглы, м;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с^2;

p_1, p_2 – абсолютное давление в начале и конце движения иглы во время запирания форсунки, МПа.

Результаты расчета изменения гидроплотности в зависимости от наработки прецизионных пар и эксплуатационных свойств дизельного топлива приведен на графике (Рис.1).



А – наработка на дизельном топливе ГОСТ 305;

В – наработка на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.

Рисунок 1 – Зависимость гидроплотности распылителей форсунок от наработки распылителей

В третьей главе «Методика экспериментальных исследований» приведены программа, общая и частные методики экспериментальных исследований. Программа исследований включала:

- исследование физических и эксплуатационных показателей дизельного топлива ГОСТ 305 и дизельного топлива с присадкой ПТЛМ;
- исследование противоизносных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ (трибологические испытания деталей распылителей форсунок; безмоторные стендовые сравнительные испытания форсунок ФД-22; оценка гидроплотности распылителей);
- стендовые моторные испытания работы двигателя Д-240 на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ;
- эксплуатационные испытания распылителей форсунок при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в условиях АПК;
- оценка эффективности результатов исследований.

Задачами экспериментальных исследований являлись проверка правомерности выдвинутых теоретических положений о возможности обеспечения работоспособного состояния, по критерию гидроплотности, прецизионных пар распылителей форсунок применением дизельного топлива с присадкой ПТЛМ, количественная оценка факторов и закономерностей, отражающих взаимосвязь компонентного состава и концентрации присадки в дизельном топливе на показатель работоспособного состояния прецизионной пары распылителя.

Для обеспечения работоспособного состояния были разработаны методы для оценки износостойкости материала прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей с применением дизельного топлива с присадкой ПТЛМ. Целью экспериментальных исследований являлось получение зависимостей изнашивания прецизионных пар распылителей форсунок (на примере форсунки ФД-22) от свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ.

Исследовалось дизельное топливо летнее ДТ-Л ГОСТ 305, используемое на предприятиях АПК.

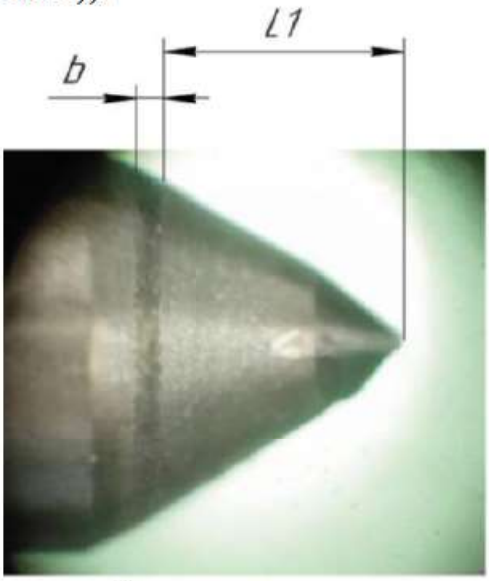
Лабораторные исследования эксплуатационных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ включали:

- определение плотности дизельного топлива;
- определение вязкости дизельного топлива.

Сравнительные трибологические испытания деталей распылителей форсунок проводились на товарном дизельном топливе и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ. Метод определения пятна износа основан на воздействии шарика, при возвратно-поступательном движении, на стальную пластину, находящихся в среде исследуемых образцов топлива с присадкой. Измерение пятна износа проводили цифровым микроскопом Celestron 40-600 с увеличением 1000х, снабжённым шкалой с ценой деления 0,01мм.

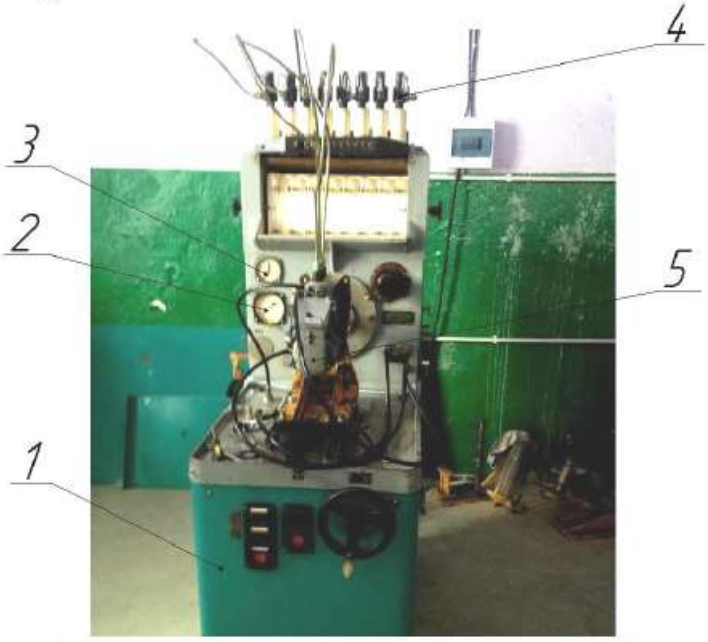
Для оценки гидроплотности сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки разработана методика, позволяющая учитывать:

- изменение веса деталей распылителя (иглы и корпуса);
- величину уплотняющей кромки b сопряжения «игла-корпус распылителя» (определение расстояния от конечной точки иглы L_1 до уплотняющей кромки, мм (Рис.2)).



L1 - расстояния от конечной точки иглы до уплотняющей кромки, мм;
b – величина уплотняющей кромки.
Рисунок 2 – Геометрические параметры исследования уплотняющей кромки сопряжения «игла-корпус распылителя».

Безмоторные стендовые сравнительные испытания распылителей форсунок ФД-22 на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ проводили на стенде КИ-921 М (Рис.3).



1 – корпус стенда; 2 – манометр; 3 – тахометр; 4 – форсунки ФД-22;
5 – топливный насос высокого давления.
Рисунок 3 – Стенд КИ - 921М

Техническое состояние (гидроплотность) сопряжений «игла – корпус распылителя» форсунок, в ходе проведения безмоторных стендовых испытаний, оценивали на приборе для проведения контрольных испытаний и регулировки форсунок КИ – 3333. Исследования проводили на 28 распылителях, что является необходимым и достаточным условием для достоверной оценки результатов экспериментальных исследований.

Для определения функциональной модели изнашивания деталей распылителя форсунки использовали ортогональный центрально-композиционный план. Регрессионная модель процесса изнашивания деталей распылителя, в общем виде, представлена зависимостью:

$$\Delta Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2, \quad (3)$$

где ΔY- функция отклика, в данном случае величина весового износа Δm, расстояние L_1 и ширина уплотняющей кромки b;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – экспериментальные коэффициенты;

X_i, X_{ij}, X_i^2 – кодированные значения факторов.

Кодирование факторов проводили по формуле:

$$X_{i\,max} = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (4)$$

где x_i - натуральное значение i-го фактора;

x_{i0}- нулевое значение i-го фактора;

Δx_i - разность верхнего и нижнего значений i-го фактора.

Опыты проводили с трёхкратной повторностью. Для исключения систематической ошибки проводили рандомизацию опытов.

В качестве варьируемых факторов являлись наработка τ сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунок и концентрация α присадки ПТЛМ в дизельном топливе. В таблице 1 приведены натуральные и кодированные значения факторов.

Таблица 1 - Уровни варьирования факторов

Фактор	Обозначение		Размерность	Значения факторов					
				Кодированные			Натуральные		
	натуральный	кодированный		нижний	нулевой	верхний	нижний	нулевой	верхний
Наработка сопряжения	τ	X_1	ч	-1	0	+1	500	1500	2500
Концентрация ПТЛМ	α	X_2	%	-1	0	+1	0	1,5	3

Оценку однородности дисперсий параллельных опытов проводили по критерию Кохрена, оценку статистической значимости коэффициентов по t – критерий Стьюдента. Регрессионную модель проверяли на адекватность по критерию Фишера.

Стендовые моторные испытания двигателя Д-240 проводились для подтверждения штатного рабочего процесса двигателя при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ. Исследования проводили на электротормозном стенде RAPIDO (Рис.4).

a b

a – Общий вид электротормозного стенда: 1 – электротормоз; 2 – динамометрический механизм электротормоза; b – Пульт управления электротормозным стендом

Рисунок 4 – Электротормозной стенд RAPIDO

В ходе исследований снимались внешние регуляторные характеристики двигателя Д-240. Техническое состояние двигателя соответствовало паспортным характеристикам.

Эксплуатационные испытания распылителей форсунок ФД–22 при работе на товарном дизельном топливе и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ проводились в условиях АПК на предприятиях ООО «ПОЛТАВА» и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» Таврического района, Омской области, на тракторах марки МТЗ-80/82, оснащенных дизелями Д-240.

Трактора эксплуатировались в период с 2018 г по 2019 г. Наработка каждого трактора за период эксплуатации находилась в пределах 2500 мото-ч.

Подбор тракторов осуществлялся исходя из требований: один год выпуска; одинаковое техническое состояние.

Производственная нагрузка, условия эксплуатации и наработка тракторов усреднялись.

Компоненты присадки (талловое и льняное масла и полиалкилбензол) заливали в ёмкость, с установленным насосом для перекачки дизельного топлива, после чего готовое дизельное топливо с присадкой ПТЛМ заливали в топливный бак трактора по мере его расходования. В процессе эксплуатационных испытаний контролировали:

- расход топлива каждого трактора расходомером;
- гидроплотность распылителей форсунок каждого трактора с интервалом 250 мото-ч. В ходе эксплуатационных испытаний устанавливали наработку распылителей форсунок, и суммарный расход топлива каждого трактора.

В четвёртой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты экспериментальных исследований и приведен их анализ.

Результаты сравнительного анализа изменения физических и эксплуатационных свойств товарного дизельного топлива и дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в зависимости от компонентного состава и концентрации присадки в дизельном топливе приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства композиции дизельного топлива и присадки ПТЛМ

Свойства	ДТ	ДТ + ПТЛМ (1%).
Плотность при 15°С, кг/м^3	860	866
Вязкость кинематическая при 20°С, мм^2/с (сСт)	4,10	4,30

Установлено, что плотность и кинематическая вязкость дизельного топлива с присадкой ПТЛМ соответствует требованиям ГОСТ.

Сравнительные трибологические испытания распылителей форсунок дизельных двигателей с использованием присадки ПТЛМ к дизельному топливу показали, что необходимая смазывающая способность дизельного топлива с присадкой ПТЛМ обеспечивается при концентрации присадки в 1%. Так, средний диаметр пятна износа образцов составляет:

- в товарном дизельном топливе – 534 мкм;
- в дизельном топливе с присадкой ПТЛМ (концентрации присадки 1%) – 440 мкм.

Результаты определения смазывающей способности дизельного топлива с присадкой ПТЛМ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения пятна износа на аппарате HFRR

Образец	$D_{из}$, мкм			$D_{ср}$, мкм	S, мкм
	1	2	3		
0 (ДТ)	539	536	527	534	6,245
1 (ДТ+1% ПТЛМ)	438	443	439	440	2,646

По результатам исследований получена зависимость изменения диаметра износа от концентрации присадки ПТЛМ:

$$D_{изн} = 25,25\alpha^2 - 100,05\alpha + 529,95 . \quad (5)$$

где α – концентрация присадки в дизельном топливе.

Таким образом, наименьший средний диаметр пятна износа 440 мкм при концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе 1%, что не превышает допустимых значений, согласно требованиям ГОСТ 305 «Топливо дизельное».

При обработке результатов весового износа получены регрессионные зависимости интенсивности изнашивания деталей распылителей от концентрации присадки ПТЛМ в топливе, в следующем виде:

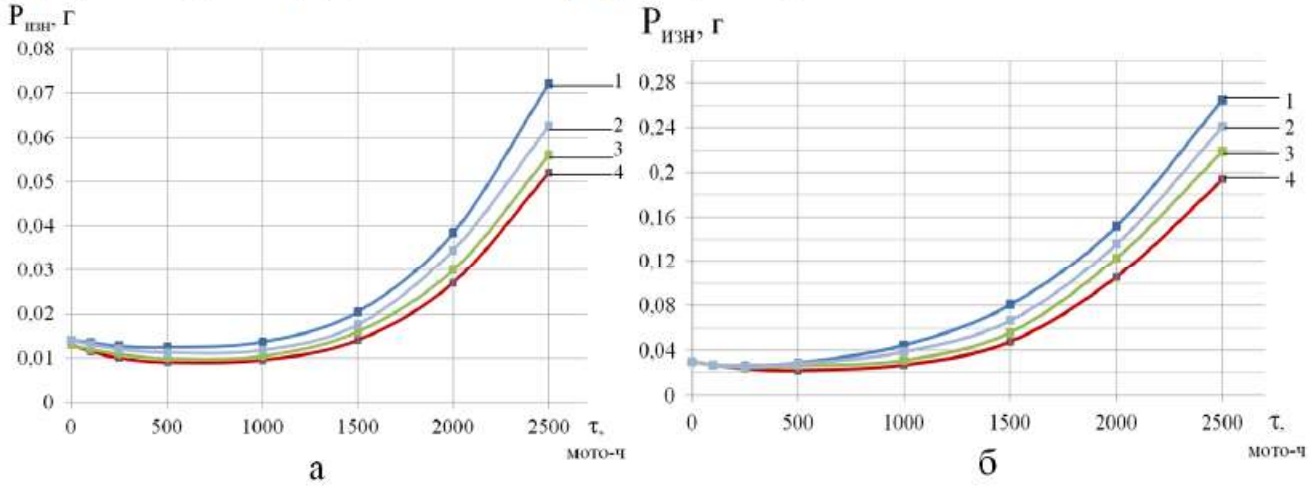
для износа иглы:

$$И_и = 2{,}66 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 5{,}22 \cdot 10^{-5} \alpha + 1{,}14 \cdot 10^{-4}. \qquad R^2 = 0{,}914 \quad (6)$$

для износа корпуса:

$$И_к = 2{,}495 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 7{,}971 \cdot 10^{-5} \alpha + 2{,}93 \cdot 10^{-4}. \qquad R^2 = 0{,}9794 \quad (7)$$

Результаты исследования весового износа иглы и корпуса распылителей форсунок ФД-22 представлены на графике (Рис.5)



1 – ДТ ГОСТ 305; 2 - ДТ+3% ПТЛМ; 3 - ДТ+2%ПТЛМ; 4 - ДТ+1% ПТЛМ.

Рисунок 5 – Средний весовой износ иглы (а) и корпуса (б) распылителей форсунок ФД-22

Установлено, что наименьший весовой износ деталей распылителей при концентрации 1% присадки ПТЛМ в дизельном топливе.

По результатам измерений длины образующей запирающего конуса L_1 от вершины конуса до уплотняющей кромки иглы распылителя получена зависимость:

$$L_1 = 5{,}028 - 3{,}07 \cdot 10^{-4} t - 0{,}07108\alpha - 8{,}7 \cdot 10^{-5} t \cdot \alpha + 3{,}94 \cdot 10^{-7} t^2 + 0{,}021508\alpha^2 \quad (8)$$

$R^2 = 0{,}8673$.

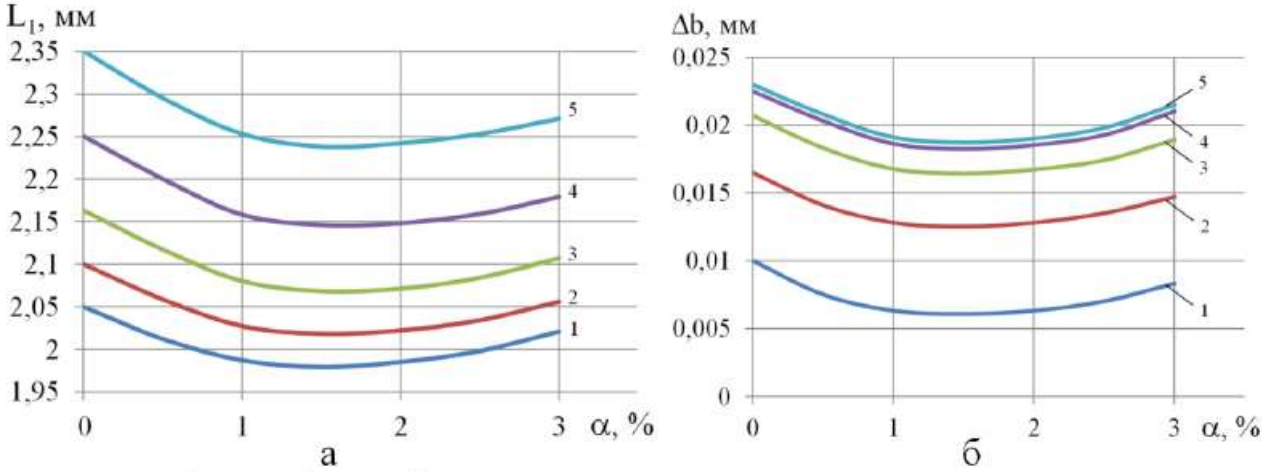
Рассчитанные по формуле (8) кривые изменения расстояния L_1, от концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе α и наработки τ сопряжения представлены на графике (Рис.6а). Согласно анализу графиков (Рис.6а) установлено, что наименьшее изменение длины L_1 при 1,5% присадки ПТЛМ в дизельном топливе.

При обработке результатов измерений величины уплотняющей кромки b в зависимости от наработки τ сопряжения и концентрации α присадки ПТЛМ получена зависимость:

$$\Delta b = 0{,}0011746\alpha^2 - 2{,}97 \cdot 10^{-2} \alpha - 6{,}8 \cdot 10^{-3} + 2{,}01 \cdot 10^{-4} t - 4{,}6 \cdot 10^{-8} t^2. \quad (9)$$

$R^2 = 0{,}9419$.

Графическая интерпретация зависимости (9) представлена на рисунке 6б. Согласно анализу графиков (Рис.6б) установлено, что наименьшее изменение ширины уплотняющей кромки иглы распылителя происходит при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации от 1% до 1,25%.



наработка τ (мото-ч): 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500; 4 – 2000; 5 – 2500.
а) длина образующей L_1 от вершины конуса до уплотняющей кромки;
б) ширина уплотняющей кромки Δb.

Рисунок 6 – Влияние концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе (α,%) и наработки (τ, мото-ч) на изменение геометрических параметров иглы распылителя форсунки ФД-22.

По результатам безмоторных стендовых испытаний форсунок ФД-22 установлено:

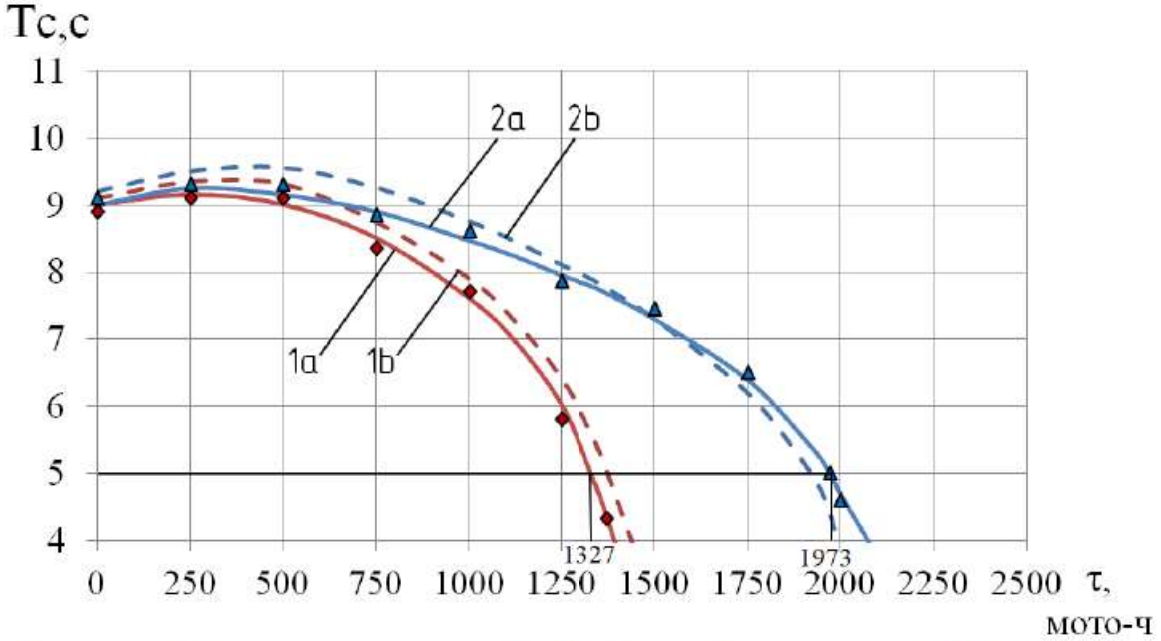
– средняя наработка распылителей, работающих на товарном дизельном топливе, составила 1327 мото-ч (при гидроплотности не менее 5 с);

– средняя наработка распылителей, работающих на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, составила 1973 мото-ч (при гидроплотности не менее 5 с), что на 646 мото-ч больше наработки распылителей, работающих на товарном дизельном топливе.

Результаты стендовых моторных испытаний двигателя Д-240 на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ показали соответствие паспортным данным: расхода топлива, мощности и крутящего момента.

Помимо этого, топливная система двигателя Д–240 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ не требует переоборудования и дополнительной регулировки.

Результаты оценки величины гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок в ходе проведения безмоторных стендовых испытаний, приведены на графике (Рис.7).



1 – средний ресурс распылителей на дизельном топливе (ГОСТ 305):
a – экспериментальный; b – теоретический.
2 – средний ресурс распылителей на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%:
a – экспериментальный; b – теоретический.
Рисунок 7 – Результаты изменения гидроплотности распылителей при безмоторных стендовых испытаниях форсунок ФД-22

Результаты эксплуатационных испытаний распылителей форсунок при работе ДВС на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в условиях АПК на предприятиях ООО «ПОЛТАВА» и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» Таврического района, Омской области свидетельствуют, что:

– средняя наработка распылителей, работающих на дизельном топливе (ГОСТ 305), составила 1421 мото-ч (при гидроплотности не менее 5 с);

– средняя наработка распылителей, работающих на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, составила 1902 мото-ч (при гидроплотности не менее 5 с).

В результате эксплуатационных испытаний установлено, что наработка распылителей при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ повысилась на 20 – 30%.

В пятой главе «Оценка экономической эффективности использования дизельного топлива с присадкой ПТЛМ» приведены результаты оценки экономической эффективности применения присадки ПТЛМ к дизельному топливу на предприятиях АПК для обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок ДВС. Расчет проведен по результатам усреднённых сравнительных испытаний по группе тракторов марок МТЗ-80/82: эталонная группа (эксплуатация на товарном дизельном топливе), экспериментальная группа – (эксплуатация на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ).

Экономическая эффективность рассчитана исходя из разности затрат товарного дизельного топлива и дизельного топлива с присадкой ПТЛМ каждого трактора.

При проведении эксплуатационных испытаний в ООО «ПОЛТАВА» и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» выявлено, что применение присадки ПТЛМ в дизельном топливе в концентрации 1% позволило получить среднегодовой экономический эффект на один трактор 17 235 руб. Расчёт произведен без учёта потерь, связанных с простоем трактора при замене деталей топливной системы, затрат на ремонт ТНВД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследовательской работы сделаны следующие выводы:

1. Выявлено, что при эксплуатации двигателя Д-240 на товарном дизельном топливе в условиях рядовой эксплуатации ресурс распылителей форсунок составляет не более 1600 мото-часов, что не соответствует показателям ресурса, приведённым заводом-изготовителем, и требует выработку мер по обеспечению работоспособного состояния прецизионных пар распылителей. Отказы распылителей форсунок возникают вследствие износа сопряжения «игла-корпус распылителя» по причине отсутствия в товарном дизельном топливе противоизносной присадки. Для обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей необходимо разработать компонентный состав присадки и определить концентрацию её в дизельном топливе. На основании анализа научных работ по данной тематике в качестве компонентов противоизносной присадки предложены таловое и льняное масла.

2. Обоснован компонентный состав присадки ПТЛМ (талловое масло 55%, льняное масло 41%, полиалкилбензол 4%) и необходимая концентрация присадки в дизельном топливе, которая составляет 1% в зависимости от режима эксплуатации распылителей форсунок дизельных двигателей. Компонентный состав и концентрация присадки ПТЛМ в топливе обусловлены исходя из эксплуатационных свойств дизельного топлива.

3. Разработана функциональная модель, позволяющая обосновать влияние дизельного топлива с присадкой ПТЛМ на гидроплотность – основной показатель работоспособного состояния сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки.

На основании разработанной функциональной модели определено, что гидроплотность распылителя при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ, увеличивается с 5 до 8 с (Рис.1), что способствует улучшению условий контакта деталей сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки, и подтверждает выдвинутую гипотезу по обеспечению работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных ДВС применением присадки ПТЛМ к дизельному топливу.

4. Разработан способ и устройство для оценки износостойкости прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей, который заключается в:

- определении гидроплотности прецизионных пар и количества распыленного топлива распылителем за установленное время на стенде КИ-921М в соответствии с ГОСТ 14846;

- сравнении фактического расхода топлива с номинальным и заключении о работоспособном состоянии распылителя, его дальнейшей эксплуатации или замены.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что гидроплотность распылителей согласно нормативно-технической документации форсунок ФД-22 (не менее 5 секунд) составляет:

– при средней наработке распылителей 1327 мото-часов, работающих на дизельном топливе согласно ГОСТ 305;

– при средней наработке распылителей 1973 мото-часов, работающих на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ, что на 646 мото-ч больше.

Техническая новизна подтверждена патентом на полезную модель.

5. По результатам эксплуатационной проверки в ООО «ПОЛТАВА» и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» установлено, что работоспособное состояние распылителей форсунок (гидроплотность не менее 5 секунд) составляет:

– при средней наработке распылителей 1421 мото-часов, работающих на дизельном топливе согласно ГОСТ 305;

– при средней наработке распылителей 1902 мото-часов, работающих на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ, что на 481 мото-часов больше, чем на товарном дизельном топливе ГОСТ 305.

6. Годовой экономический эффект на один трактор марки МТЗ-80/82 при использовании дизельного топлива с присадкой ПТЛМ (в концентрации 1%) составил 17 235 рублей, за счет обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок и увеличения их наработки с 1421 до 1902 мото-часов.

Дальнейшие исследования могут быть, главным образом, направлены на снижение погрешности оценки результатов разработанных методик исследования.

Разработанная методика анализа влияния факторов (эксплуатационных свойств дизельного топлива) на изнашивание прецизионных пар распылителя даёт основу для последующего расширения доступной информации об их применимости для выявления причин тех или иных неисправностей.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.

Результаты исследований могут быть использованы на предприятиях агропромышленного комплекса, занимающихся эксплуатацией машинно-тракторного парка, а также в учебном процессе при подготовке инженерных кадров. Для предприятий АПК можно рекомендовать следующие режимы приготовления присадки ПТЛМ: температура приготовления 55-60 ^{0}С, соотношение компонентов: талловое масло 55%, льняное масло 41%, полиалкилбензол 4%. Содержание присадки ПТЛМ в топливе 1%. Смешивание производить перемешивающим насосом в топливном контейнере с герметичной крышкой в течении 30 мин. Перемешивание компонентов

затруднено при низких температурах окружающей среды, что обусловлено увеличением вязкости дизельного топлива и растительных масел.

Основные публикации по теме диссертации:

В журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus

1. Keruchenko L.S. Improvement of Antiwear Properties of Diesel Fuels by Compounding with Additive Based on tall and Linseed Oil / L.S. Keruchenko, R. V. Damanskiy // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-5, June 2019, pp. 2174-2177.

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

2. Керученко Л.С., Факторы, определяющие износ запорного сопряжения распылителя форсунки дизельного двигателя / Л.С. Керученко, И.В. Веретено, Р.В. Даманский // Вестник ОмГАУ № 2 (22) Апрель – июнь 2016. – С. 222-226.

3. Керученко, Л.С. Влияние неисправностей распылителей дизельных форсунок на процесс впрыска топлива / Л.С. Керученко, Р.В. Даманский // Международный научно-исследовательский журнал № 01 (55) Часть 4 Январь 2017. – С. 78-81.

4. Керученко, Л.С. Изменение зазора в запорном сопряжении распылителя форсунки дизеля / Л.С. Керученко, Т.Ю. Гурин, Р.В. Даманский // Сельский механизатор. № 11. – 2017. – С. 36-37.

5. Даманский, Р.В. Оценка эффективности использования дизельного топлива с присадкой ПТЛМ на примере работы прецизионных сопряжений распылителей форсунок / Р.В. Даманский / Вестник Омского ГАУ, 2020г. №2 (38). С. 152-158.

6. Даманский, Р.В. Исследование параметров износа уплотняющего пояска запорного конуса иглы распылителя форсунки фд-22 при работе на дизельном топливе с добавкой / Р.В. Даманский, Л.С. Керученко, А.Е. Немцев // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (40). С. 118-124.

Публикации в журналах, сборниках научных трудов, материалах конференций

7. Керученко, Л.С. Теоретическое исследование износа запорного сопряжения распылителя форсунки / Л.С. Керученко, Р.В. Даманский // Стратегия устойчивого развития регионов России: Материалы XXXVI Всероссийской научно - практической конференции. – Новосибирск: Изд-во Центр развития научного сотрудничества, 2016. – С. 144-147.

8. Ишутко А.С. Противоизносные присадки к дизельным топливам / А.С. Ишутко, Д.Е. Кузьмин, Р.В. Даманский, Л.С. Керученко // Проблемы и перспективы разработки инновационных технологий: Материалы международной научно - практической конференции. – Оренбург: Изд-во Агентство международных исследований, 2018. – С. 19 – 22.

9. Даманский Р.В., Керученко Л.С. Влияние добавки растительных масел в дизельное топливо на закоксовываемость распылителей форсунок / Р.В. Даманский, Л.С. Керученко // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы X региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти

доцента М.А. Анфиногенова. – Новосибирск: Изд-во ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, 2018. –С. 80-85.

10. Даманский, Р.В. Исследование процесса топливоподачи форсункой ФД-22 при работе дизельного двигателя на дизельном топливе с присадкой на основе растительных масел. / Р.В. Даманский // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири: материалы Междунар. науч.-технич. конф. (п. Краснообск, 3-4 октября 2019 г.) / Сибирский научно исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН. – Новосибирск, 2019. – 329 с.

11. Керученко, Л.С. Влияние добавок рапсового масла на противоизносные свойства дизельного топлива / Л.С. Керученко, Р.В. Даманский // Сборник всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Инновационные технологии в АПК, как фактор развития науки в современных условиях» / Омский ГАУ. –2019. с. 145-149.

12. Керученко, Л.С. Исследование массового износа деталей распылителя форсунки ФД-22 при работе на дизельном топливе с добавкой, состоящей из таллового и льняного масел / Л.С. Керученко, Р.В. Даманский, А.Е. Немцев // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Материалы XII региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова. 2020. С. 75-78.